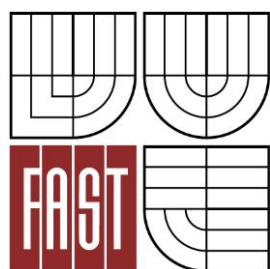




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT  
A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# PROBLEMATIKA BETONŮ PRO VODONEPROPUSTNÁ BETONOVÁ OSTĚNÍ TUNELŮ

THE ISSUE OF WATERPROOF CONCRETE FOR THE CONCRETE TUNNEL LINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

VÁCLAV DIPOLD

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Václav Dipold
<b>Název</b>	Problematika betonů pro vodonepropustná betonová ostění tunelů
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2013
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

Časopis Beton TKS

Časopis Tunel

Pierre-Claude Aïtcin: Vysokohodnotný beton

ČSN EN 206-1 Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

Technické předpisy MD ČR pro stavby pozemních komunikací

Zahraniční technické předpisy pro stavby pozemních komunikací

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje

## **Zásady pro vypracování**

Cílem bakalářské práce bude shrnutí dosavadních poznatků týkajících se problematiky vodonepropustného betonového ostění ražených a hloubených tunelů. Důraz bude kladen zejména na vlastnosti betonu, kdy budou sledovány parametry a požadavky na beton v čerstvém a ztvrdlém stavu.

Základní body bakalářské práce budou následující:

- Popis a shrnutí dosavadních poznatků o betonu týkajících se ostění tunelů,
- shrnutí vlastností čerstvých betonu pro vodonepropustná ostění tunelů, jako jsou požadavky na vývin hydratačního tepla, zpracovatelnost betonu, požadavky na teplotu betonu při ukládání a možnosti použití samozhutnitelného betonu pro tento typ konstrukcí,
- shrnutí vlastností ztvrdlých betonů pro tunelová ostění, jako jsou pevnostní charakteristiky, moduly pružnosti betonu, trvanlivost betonu a objemové změny,
- kritéria pro posuzování kvality povrchu betonu.

Část bakalářské práce bude zaměřena také na praktické aplikace týkající se tohoto typu betonu. Bude proveden návrh receptury betonu pro vodonepropustná ostění, kdy bude velký zřetel kladen na požadavky a posouzení vlastností betonu v čerstvém i ztvrdlém stavu.

Rozsah práce cca 40 stran.

## **Předepsané přílohy**

.....

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá shrnutím požadavků na vodonepropustná ostění tunelů. Poté se zaměřuje na parametry a požadavky na beton pro ostění. Důraz bude kladen jak požadavky na beton v čerstvém stavu, jako je například vývin hydratačního tepla, požadavky na teplotu betonu při ukládání, tak na požadavky na beton v ztvrdlém stavu, jako jsou například pevnostní charakteristiky, moduly pružnosti a objemové změny. Následně je probírána možnost využití samozhutnitelného betonu pro tento typ konstrukcí.

**Klíčová slova:** tunel, vodonepropustné ostění, tunely bez izolace, beton

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with a summary of requirements for waterproof lining of tunnels. Then focuses on the characteristics and requirements for concrete lining. Emphasis will be on requirements for fresh concrete, such as the hydration heat, the temperature requirements of concrete during storage and the requirements for concrete in the hardened state such as strength properties, modulus of elasticity and volume changes. Subsequently is discussed possibility of using SCC for this type of construction.

**Keywords:** tunnel, waterproof tunnel lining, tunnels without hydroisolation, concrete

## **Bibliografická citace VŠKP**

Václav Dipold *Problematika betonů pro vodonepropustná betonová ostění tunelů*. Brno, 2014. 66 s.,  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních  
hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2014.

.....  
podpis autora

Václav Dipold

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za cenné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

# 1 OBSAH

<b>ABSTRAKT.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
<b>Prohlášení.....</b>	<b>6</b>
<b>Poděkování.....</b>	<b>7</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Metodika a cíle práce literární rešerše .....</b>	<b>11</b>
<b>3 Metody zhotovování tunelů .....</b>	<b>12</b>
3.1 Vystrojení výrubu .....	13
<b>4 Ostění ze stříkaného betonu .....</b>	<b>15</b>
4.1 Jednoplášťová ostění ze stříkaného betonu.....	15
4.2 Technologie nástřiku mokrou cestou.....	16
4.3 Porovnání technologie nástřiku suchou a mokrou cestou .....	17
4.4 Odlišnosti stříkaného betonu od monolitického .....	17
4.5 Požadované pevnosti betonu pro tunelová ostění .....	18
4.6 Složky stříkaného betonu.....	18
4.7 Dodatečné zajištění kvality povrchu.....	21
<b>5 Ostění z monolitického betonu .....</b>	<b>22</b>
5.1 Obecně .....	22
5.2 Tunely bez hydroizolace a jejich porovnání s klasickými tunely (s mezilehlou izolací).....	22
5.3 Transport vlhkosti v betonu .....	23
5.4 Vodonepropustnost .....	24
5.5 Návrh složení betonu .....	26
5.6 Třída pevnosti betonu .....	26
5.7 Teplotní rizika pro vodonepropustná ostění .....	27
5.8 Popílek, jeho vlastnosti a vliv na trvanlivost betonu .....	28
5.9 Omezení vzniku trhlin .....	29
5.10 Vodonepropustná sekundární ostění tunelů .....	30
5.11 Odolnost proti průsaku tlakové vody.....	30
5.12 Beton vodotěsného sekundárního ostění bez izolace.....	31
5.13 Mrazuvzdornost .....	32
5.14 Odolnost betonu proti síranům .....	32
5.15 Výztuž v betonu .....	33



5.16	Zpracovatelnost betonu .....	34
5.17	Doprava betonu .....	35
5.18	Ukládání betonu .....	35
5.19	Bednicí vozy .....	36
5.20	Ošetřování betonu .....	36
5.21	Požadavky na povrch ostění betonu .....	36
5.22	Požární odolnost betonu .....	37
5.23	Polypropylenová vlákna .....	39
<b>6</b>	<b>Možnost využití samozhutnitelného betonu pro vodonepropustné ostění tunelů .....</b>	<b>40</b>
6.1	Použití a trvanlivost samozhutnitelného betonu .....	40
6.2	Složení samozhutnitelného betonu .....	41
6.3	Vlastnosti samozhutnitelného betonu .....	43
6.4	Zkoušky na testování samozhutnitelných betonů .....	44
6.5	Zkouška rozlitím kužele a čas $T_{500}$ .....	44
6.6	Zkouška L-boxem .....	44
6.7	Informace získané ze zkoušek konzistence čerstvého SCC .....	45
<b>7</b>	<b>Experimentální část .....</b>	<b>46</b>
7.1	Cíle experimentu práce .....	46
7.2	Složení betonu .....	46
7.3	Metodika práce .....	47
7.4	Výsledky zkoušek .....	48
7.5	Shrnutí výsledků zkoušek .....	52
<b>8</b>	<b>Vyhodnocení experimentální části .....</b>	<b>58</b>
	<b>Závěr .....</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliografie .....</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>65</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>66</b>

# 1 ÚVOD

Tato práce se zabývá možností využití betonu pro vodonepropustná betonová ostění tunelů. V České republice se běžně vyskytují ostění, která mají mezilehlou izolaci. Tato izolace slouží proti tlakové vodě. Při vyztužování sekundárního ostění tunelů a jeho betonáži však velmi často dochází k porušení této hydroizolační vrstvy a následné řešení problému je velmi složité a mnohdy finančně náročné. Navíc provádění mezilehlé izolace je velice zdoluhavé a z hlediska technologie provádění se jedná o nežádoucí zdržení výstavby tunelu. Z toho důvodu se začínají dělat tunely, kde samotné betonové ostění tuto vodonepropustnost zaručuje a tím dochází k eliminaci problémů. Pokud u vodonepropustného ostění přes veškerou snahu dochází k průsaku, je daleko jednodušší tuto netěsnost lokalizovat a zjednat nápravu. Tunelové ostění však nemusí být navrženo pouze z monolitického betonu, ale může být zhotoveno i ze stříkaného betonu jako jednoplášťové ostění. Novinkou ve výstavbě tunelů je částečné započítání primárního ostění do ostění sekundárního. V podstatě se jedná o problém degradace primárního ostění. Primární ostění totiž časem degraduje, ale není nutné celou tuto část označit za ztracenou. Beton primárního ostění tedy lze částečně připočítat do ostění sekundárního za předpokladu, že splňuje požadavky (i na vodonepropustnost) kladené na sekundární ostění tunelů. Další možností je využití samozhutnitelného betonu pro tento typ ostění. Samozhutnitelný beton se začal používat z toho důvodu, že u klasického monolitického betonu je nutné hlídat proces hutnění. I přes důkladnou kontrolu však dochází často k nesprávnému zhutnění v celém průřezu ostění. Při spojení s tvrzením, že vodonepropustná betonová ostění mají vyšší stupeň vyztužení, než běžná ostění lze konstatovat, že i tento typ betonu je velmi vhodný pro betonáž takového typu ostění tunelu.

## **2 METODIKA A CÍLE PRÁCE LITERÁRNÍ REŠERŠE**

Tato práce je sestavena na základě teoretických poznatků o problematice vodonepropustných betonových ostění tunelů. Cílem práce je především shrnout veškeré podstatné poznatky, jež se týkají problematiky vodonepropustných betonových ostění. Ostění tunelů lze rozlišit na ražená a hloubená. Ražená vodonepropustná ostění mohou mít část primárního ostění započítanou do sekundárního ostění (v tom případě, že beton primárního ostění splňuje požadavky kladené na sekundární ostění). Případně je možné celé ostění zhotovit z vodonepropustného stříkaného betonu (jako jednoplášťová ostění). Následně bude detailně probírána problematika monolitického betonu pro tento typ ostění. Lze totiž předpokládat, že v budoucnu se bude většina tunelů zhotovovat z vodonepropustného monolitického betonu s tím, že v rámci úspor bude část primárního ostění započítávána do sekundárního ostění. Následně bude kladen důraz na prozkoumání možnosti využití samozhutnitelného betonu pro vodonepropustná ostění tunelů. U betonů budou zkoumány požadavky na beton v čerstvém a ztvrdlém stavu, požadavky na vývin hydratačního tepla, na zpracovatelnost betonu, požadavky na teplotu při ukládání a shrnutí požadavků na ztvrdlý stav (požadavky na vývin pevností, moduly pružnosti, trvanlivost betonu a objemové změny). V rámci literární rešerše budou taktéž zmíněny požadavky na posouzení kvality povrchu ostění.

### 3 METODY ZHOTOVOVÁNÍ TUNELŮ

Liniové stavby – jedná se o inženýrské stavby charakteristické tím, že je u nich převládajícím parametrem délka. Liniové stavby lze dále členit na štoly a tunely. Štoly se od tunelů liší tím, že se zpravidla jedná o díla se světlym průřezem do  $16\text{m}^2$ , zatímco do tunelů řadíme díla nad  $16\text{m}^2$ . Podle sklonu můžeme dále rozlišit na rovné nebo ukloněné [31].

Tunel – liniový podzemní objekt s podélným sklonem do  $60^\circ$  a výrubovým průřezem větším než  $16\text{m}^2$ , jenž byl vybudován ražením či hloubením [31]

Ostění – jedná se o trvalou konstrukci tunelu z vnitřní strany, jenž je spřažená s horninovým prostředím podzemní stavby. Ostění zajišťuje stabilitu výrubu a další požadované funkce raženého díla při výstavbě i za provozu [31].

Výrub – podzemní prostor, jenž byl vytvořen rozpojením horniny v podélném řezu, dále pak naložením horniny a odvozem. Vertikálně lze rozlišit části výrubu na kalotu (přistropí), opěří a dno tunelu [31]

Dle technologie rozlišujeme na konvenční ražení a kontinuální metody ražení. Konvenční ražení se uskutečňuje dle zásad nové rakouské tunelovací metody (NRTM). Ražba tunelu je činnost, při které nahrazujeme rubaninu novým materiálem, kterým je železobeton. K této činnosti dochází v pracovních postupech (tzv. záběrech). Délka jednotlivých záběrů je odvislá především od kvality zeminy a použité technologie.

Pokud používáme konvenční metodu NRTM, tak nám výztužné rámy, které mohou být příhradové nebo z ocelových nosníků o různých profilech (nejčastěji I profil, korýtko) udávají délky jednotlivých záběrů. Tyto rámy se tedy zabudují po provedení právě jednoho záběru. Délka záběru se řádově pohybuje v intervalu 0,5 až 3 m. Pro NRTM je charakteristické cyklické uspořádání prací a také to, že se nerazí na celý profil [31].

Provedení záběru se tedy skládá z přesného sledu operací, které se opakují při každém dalším záběru. Nejdříve se provede rozpojování horniny. Rozpojení může být provedeno buď za použití trhavin, nebo bez použití trhavin. Při použití trhavin se nejdříve provádí navrtávání. Toto navrtávání se uskutečňuje vrtacími kladivy, která mohou být hydraulická či pneumatická. Dále se pak uskutečňuje nabíjení a odstřel. Po provedení odstřelu je nutné odvětrávání, které následně přechází v prohlídku a čištění čela. Poté se již uskuteční nakládání a odvoz rubaniny a odsun nakladačů [31].

Pokud se provádí rozpojení bez použití trhavin, je nutné použít rozpojovací stroje. Stroje vhodné pro rozpojování horniny do cca 50 MPa se nazývají frézy. Pokud je nutné lokální rozpojování či profilace, je vhodné využití hydraulických kladiv takzvaných impaktorů

a pokud je třeba výkonných bagrů, jež jsou vhodné pro rozpojování měkkých hornic řádově (30–40 MPa) je vhodné užití tunelbagrů. Samotné nakládání rubaniny se uskutečňuje kontinuálním způsobem pomocí ramenového nakladače na kolejovém podvozku, který přihrnuje zeminu k hrablovému dopravníku. Doprava rubaniny se uskuteční pomocí samovyklápečího vlaku bez čelních přepážek, kde je dno tvořeno hrablovým dopravníkem. Po tomto odtěžení horniny se pokračuje ve stabilizaci výrubu. Dle projektu se uskutečňuje vrtání kotev, stříkání betonu na čelo budoucího tunelu. Tyto části však nejsou nezbytně nutné a uskutečňují se pouze v souladu s projektovou dokumentací. Následuje montáž výztuže, při které se používají ocelové nosníky a Kari sítě (mohou být nahrazeny rozptýlenou ocelovou výztuží). Ocelové nosníky jsou také často označovány jako ramenáty [27]. Následuje zajištění stříkaným betonem. Po provedení tohoto postupu máme již zhotovené primární ostění.

Další možností je využití kontinuální metody ražení s mechanickým rozpojováním horniny. Tato moderní metoda ražení dovoluje razit tunel na celý profil. Pracovní operace při této metodě probíhají kontinuálně a tunelovací plnoprofilové stroje zde razí výrub, který je již připraven na vystrojení. Při této metodě je vhodné například i použití prefabrikovaných železobetonových dílců [7], [31].

### **3.1 Vystrojení výrubu**

Vystrojení výrubu se uskutečňuje využitím výše zmíněného primárního ostění a dále pak sekundárním ostěním. Primární ostění (někdy nazývané také jako provizorní) má především tyto funkce: zajištění stability výrubu, omezení přetvárnosti horninového prostředí a přenášet zatížení. Vyztužení se provádí pomocí ocelové obloukové výztuže, která slouží jako tuhá výztuž stříkaného betonu a má hlavní nosnou funkci především při počátku tuhnutí stříkaného betonu, který ještě nemá dostatečnou pevnost. Jako oblouky lze využít buďto plnostěnné válcované oblouky nebo příhradové oblouky. Oblouky se většinou dodávají jako třídílná sestava s tím, že se spojuje přesah pomocí spojky se třmenem. Další možností je využití stříkaného betonu se sítí případně s rozptýlenou výztuží. Vyztužuje se ocelovou Kari sítí o velikosti ok  $150 \times 150$  mm, případně se používají stříkané vláknobetony s různě tvarovanými ocelovými vlákny [7].

Sekundární ostění (nazývané též jako definitivní) musí zajistit spolehlivou ochranu vnitřního prostoru tunelu po celou dobu navrhované životnosti díla, která se v současné době stanovuje nejčastěji na 100 let. Další důležitou funkcí je to, že vodonepropustné betonové ostění slouží jako ochrana proti tlakové vodě, aniž by bylo třeba hydroizolační fólie. Sekundární ostění se zhotovuje z prostého nebo vyztuženého betonu. Nejčastější tloušťka ostění činí v současnosti

0,3 m (výjimečně se používá tloušťka jen 0,25 m). Tato doporučená tloušťka však platí pouze pro ostění s mezilehlou izolací, při návrhu vodonepropustného ostění doporučuje zahraniční literatura tloušťku minimálně 0,35 m [17]. Krytí výztuže betonem se z důvodu požární odolnosti stanovuje na 40 mm. Při použití monolitického betonu se betonuje do kovových pojízdných bednicích vozů, které mají plášť složený z několika kloubů. Po vybetonování se plášť díky kloubům složí, bednicí vůz popojede dál a plášť se zase rozloží.

Sekundární ostění se provádí tak, že se nejdříve profiluje povrch primárního ostění a to tak, že se odstraní všechny ostré hrany a kovové součásti. Dále se nanáší vyrovnávací vrstva tak, aby maximální nerovnosti povrchu primárního ostění byly v souladu se zaručenou průtažností hydroizolační fólie. Dále se pak umístí drenážní rouno, což je ve své podstatě řídká tkaná geotextilie, jenž má za úlohu zachytávat podzemní vodu, která prosakuje přes primární ostění tunelu. Toto drenážní rouno následně vodu svádí do drenážního systému tunelu. Další funkcí drenážního rouna je chránění hydroizolační fólie proti mechanickému poškození. Následně se pak umístí hydroizolační plášť, což je vlastně fólie z měkčeného polyvinylchloridu nebo polyethylenu o tloušťce 2,0 až 3,0 mm, jejíž pevnost v tahu se pohybuje řádově mezi 10 až 20 N/mm<sup>2</sup>. Průtažnost při přetržení má být 200 až 600 %. Po vytvoření hydroizolačního pláště se zkouší vodotěsnost svarů pomocí stlačeného vzduchu [7].

## 4 OSTĚNÍ ZE STŘÍKANÉHO BETONU

Pro ostění primární i sekundární se často používá stříkaný beton. Stříkaný beton se dříve používal pro dočasnou stabilizaci výrubu a jednalo se tedy o konstrukci, která měla přenášet pouze krátkodobé až střednědobé zatížení. Následně bylo prováděno permanentní sekundární ostění, kde již bylo uvažováno s návrhovou životností tunelu. Tento postup je nazýván jako takzvaný dvouskořepinový. V dnešní době však udělala technologie stříkaného betonu velké pokroky a to především v oblasti užitných parametrů. Současný stav technologie stříkaného betonu umožňuje jednoskořepinový stavební postup. Jedná se tedy o permanentní ostění ze stříkaného betonu, které je kromě schopnosti přenášet zatížení velmi trvanlivé a především vodotěsné [1], [35]. Hlavní výhodou tohoto postupu je podstatné snížení nákladů [1].

V České republice je zatím stříkaný beton považován, za méně kvalitní s tím, že nemá dostatečnou trvanlivost a hodí se pouze jako primární ostění. Avšak pokud použijeme moderní metody, materiály a dostatečnou kontrolu výroby, dostaneme beton, který je svou kvalitou srovnatelný s monolitickým. V průběhu posledních patnácti let dosáhl stříkaný beton takového pokroku, že byl s úspěchem použit jako trvalé sekundární ostění například na takových stavbách, jako jsou dopravní tunely Vereina, Heathrow [5], [1], [35]. Přes všechny předsudky v České republice byl stříkaný beton pro definitivní ostění také použit, a to například při realizaci tunelového komplexu Blanka. Zde se stříkaného betonu užívalo při realizaci horních kleneb všech ražených přípojek. Tato technologie byla také využita pro tvarově komplikovaná místa, aby se nemuselo vyrábět atypické bednění pro monolitický beton [18]. Stříkaný beton může plnit funkci trvalého ostění nebo minimálně může sloužit jako jeho část. Na tento beton však musí být kladeny požadavky zejména na vodotěsnost. Vodotěsnosti lze u stříkaného betonu docílit pomocí krystalizačních přísad. Dále je potom nutné zajistit soudržnost vrstvy stříkaného betonu se sekundárním ostěním (aby bylo možné částečně uvažovat stříkaný beton jako trvalou součást sekundárního ostění). Kromě zvýšených požadavků na vodotěsnost je nutné při uvažování permanentního ostění ze stříkaného betonu také zvýšit požadavky na kvalitu dodávaného stříkaného betonu a na podstatné zvýšení životnosti stříkaného betonu. Případně je možné uvažovat stříkaný beton výhradně pro jednoplášťová ostění [27], [30].

### 4.1 Jednoplášťová ostění ze stříkaného betonu

Jednoplášťová ostění patří k nynějším nejmodernějším trendům vytváření betonového ostění tunelů. Při využití jednoplášťového ostění uvažujeme část vrstvy jako trvalou vrstvu, která má

nosnou funkci. Pokud použijeme výše zmíněný jednoskořepinový stavební postup, nemusíme aplikovat izolaci a následnou realizaci sekundárního ostění, čímž se výrazně zrychlují a také zlevňují stavební práce na jednotlivých záběrech. Mezi negativa je však nutno zařadit vyšší cenu stříkaného betonu oproti betonu monolitickému a také složité prokazování dlouhodobé únosnosti a vodonepropustnosti. Avšak i přes tyto zmíněná negativa má stříkaný beton pořád své použití a to například na již zmíněném letišti Heathrow, kdy bylo touto metodou realizováno ostění u projektu Terminal 5. Na tomto projektu bylo ostění konkrétně provedeno jako nevyztužené (bez výztužných sítí). Z tohoto důvodu bylo celkové řešení problémů zjednodušeno o problematiku koroze výztuže. Přestože bylo ostění navrženo jako nevyztužené, byla do betonové záměsi přidávána ocelová vlákna pro zvýšení houževnatosti [5]. Nicméně jiné literatury [17] zmiňují, že stříkaný beton může být sice vyráběn ve vodonepropustné kvalitě, ale jelikož tento materiál má velkou tendenci se smršťovat a jsou zde problémy vyplývající z vodotěsného provedení spár, tak tento beton není příliš vhodný pro realizaci vodonepropustného jednoplášťového ostění [17]. Jelikož se jedná o překlad z německé literatury, tak by bylo velmi vhodné se tímto doporučením řídit. Tento beton se však jistě nechá použít minimálně při částečném započítání primárního ostění do ostění sekundárního. Metodou LaserShell lze vytvořit jednoplášťová ostění, kde je stříkaný beton použit jako vodotěsné ostění tunelu.

Jednoplášťová ostění jsou realizována ve třech vrstvách. První vrstva slouží ke stabilizaci výrubu a také pro zlepšení vodotěsnosti ostění. Ze statického hlediska však tuto vrstvu považujeme za ztracenou z důvodu možného působení síranů. Druhá vrstva je již konstrukční a lze ji provádět v několika fázích. Dokončující vrstva je následně aplikována na vrstvu konstrukční z důvodu lepší estetiky [35].

## **4.2 Technologie nástřiku mokrou cestou**

Hlavní výhodou je, že se zvedl průměrný denní výkon oproti nástřiku suchou cestou a to 4–5krát. Velkým vlivem především na hospodárnost bylo snížení spadu materiálu a to asi o 25 %. Došlo rovněž k výrazným pokrokům v kvalitě betonu. Nezanedbatelnou výhodou je také fakt, že ke kolísání kvality dochází pouze ve velmi úzkých hranicích. Snížením vodního součinitele (nízká hodnota  $v/c$ ) v kombinaci s použitím mikrosiliky umožňuje dosažení vysokých pevností (až 100 MPa) [1]. Některé zdroje [30] však udávají nižší pevnosti kolem 80 MPa. Pokud budeme dále uvažovat s nižší hodnotou z uvedených pevností, dochází i přes to ve spojení s výrazným vývojem strojního zařízení pro realizaci nástřiku k výborným předpokladům pro využití stříkaného betonu i pro trvalé konstrukce, které vyžadují dlouhou



životnost. Bylo totiž prokázáno, že lze vytvořit stříkaný beton, jenž dokáže splnit stejné požadavky, které jsou kladeny na monolitická sekundární ostění tunelů [30].

V případě ostění tunelů se používá nejčastěji stříkaný beton, jenž je nanášen mokrou cestou. Suchý způsob nástřiku je možné využít pouze ve speciálních případech oprav ostění. Jinak se suchý způsob používá pouze ke zhotovování dočasného (primárního) ostění, které však neplní hydroizolační funkci [27].

Z hlediska technologie provádění se mokrý způsob nástřiku uskutečňuje za pomoci hutného proudu nebo řidším provzdušněným proudem. Rozdíl je v tom, že u hutného proudu je vytlačování betonu prováděno modifikovaným čerpadlem na beton. Při této technologii si můžeme představit strojní potrubí shodně jako například potrubí u klasického monolitického čerpaného betonu. Oproti tomu u řídkého proudu je médium vzduch, jenž je vytlačován ze stříkacího stroje. U mokrého způsobu se přímo do trysky dávkuje vždy urychlovací přísada, v případě používání čerpadla (tedy v případě využití hutného proudu) se do trysky také navíc dávkuje stlačený vzduch [30].

#### **4.3 Porovnání technologie nástřiku suchou a mokrou cestou**

V dnešní době se používají dvě technologie stříkaného betonu a každá metoda má své nedostatky. Při použití technologie nástřiku suchou cestou je voda potřebná pro hydrataci přidávána přímo do trysky. Při technologii nástřiku mokrou cestou již směs při míchání obsahuje potřebné množství vody. Vzhledem k rozdílnosti technologií by každá metoda měla být zvážena vzhledem ke stavebnímu záměru. V dnešní době se však využitelnost posouvá ku prospěchu nástřiku mokrou cestou. Je to z důvodu lepších pracovních podmínek, vyšší a především stejnoměrnější kvality nástřiku [1].

#### **4.4 Odlišnosti stříkaného betonu od monolitického**

Pokud posuzujeme vlastnosti a technologii provádění stříkaného betonu, je nutné brát ohled na odlišnosti stříkaného betonu od betonu monolitického. Na vlastnosti (především na pevnosti a na trvanlivost betonu) má velký vliv vnější činitel a tím je lidský faktor. Na operátorovi trysky je odvislá kvalita a dosažení požadovaných vlastností stříkaného betonu. Při manipulaci s tryskou by měl být kladen zřetel na dodržování kolmosti dopadu betonu na podklad. Operátor by měl brát ohled na místo nánosu betonové směsi (zda se jedná o opěří či kalotu výrubu). Z těchto důvodů je nutné pečlivé vybírání a zaškolování pracovníků, kteří se podílejí na nanášení betonové směsi (zejména operátoři trysek a nástřikávači) [19].

V současné době dochází k tomu, že se zpřísňují kritéria pro stříkaný beton, který bude plnit statickou funkci (konstrukce trvalého charakteru, kterou je i ostění tunelu). Na takový beton jsou kladeny zejména zvýšené požadavky na trvanlivost, odolnost vůči zmrazování a chemickým rozmrazovacím látkám a na zvýšení vodonepropustnosti [19].

#### **4.5 Požadované pevnosti betonu pro tunelová ostění**

Pro beton, jenž má být využitý jako ostění tunelu je předepsána minimální pevnostní třída C20/25 X0 [7]. Tento beton je totiž z hlediska dalších požadavků vhodný pouze pro primární ostění, která nemají hydroizolační funkci. Beton této třídy je tedy nevhodný pro využití na vodonepropustná betonová ostění tunelů. Jako minimální požadavek se tedy pro stříkaný beton požaduje pevnostní třída C30/37. Navíc by měla být zvolena třída agresivity prostředí XC3, aby bylo možné tento beton (alespoň částečně) započítat do vodonepropustného ostění tunelu [27].

#### **4.6 Složky stříkaného betonu**

Základními složkami pro výrobu stříkaného betonu jsou pojivo pro nástřík, kamenivo, voda, příměsi a přísady. Je velice důležité, aby příměsi a přísady byly co nejvíce sladěny s pojivem pro nástřík (s cementem). Toto sladění se následně projevuje předem očekávanými nárůsty pevností stříkaného betonu, jeho zpracovatelností a v neposlední řadě také jeho konečnými pevnostmi. V následujících podkapitolách jsou uvedeny a podrobněji popsány suroviny pro výrobu stříkaného betonu [27].

##### **Cement**

Jedná se o pojivo pro stříkaný beton. Dávkování tohoto pojiva je velmi důležité, neboť má velký vliv na výslednou trvanlivost a také pevnost betonu. Je doporučeno používat cementy, které dosahují vyšších pevností (CEM I 42,5 R). Pro mokrý a suchý způsob je však odlišné dávkování pojiva. Pro suchý způsob nástřiku je doporučeno množství cementu od 370 do 430 kg/m<sup>3</sup>. Protože se pro trvalá ostění používá výhradně mokrý způsob zpracování, je nutné, aby se dávkování cementu pohybovalo v intervalu 400–450 kg/m<sup>3</sup> [30].

##### **Kamenivo**

Stejně jako u jiných druhů speciálních betonů je i kvalita kameniva velmi důležitá. Je velmi důležité dodržet vhodnou křivku zrnitosti kameniva s tím, že pro dosažení dobrých vlastností stříkaného betonu je nutné využívat jemných frakcí kameniva. Při využití zrn kameniva větších jak 8 mm, je velmi vhodné zvolit křivku zrnitosti tak, aby podíl zrn nad 8 mm nebyl

větší jak 10 %. Velká zrna totiž porušují předem nanesenou vrstvu betonu, mohou způsobovat nežádoucí deformace či vibrace výztuže a také ohrožují pracovníky [30].

Jelikož se při realizaci ostění uvažuje spíše využití mokrého způsobu nástřiku, je nutné optimalizovat křivku zrnitosti kameniva s ohledem na čerpatelnost betonu. Pokud máme příliš málo jemného podílu kameniva, může nám to při mokrému nástřiku způsobit až segregaci, zhoršení přilnavosti stříkaného betonu k podkladu a ucpávání zařízení [30].

### **Příměsi (mikrosilika)**

Mikrosilika je velice reaktivní umělý pucolán s velice jemnou amorfni strukturou, který je schopen ve velké míře vázat především alkalické ionty. Mikrosilika je velice důležitá především kvůli tomu, že v prostoru rozděluje hydratační produkty a má jakousi plnicí schopnost. V praxi to znamená, že je konstrukce z betonu více vodonepropustná a zvýší se také schopnost betonu odolávat mrazu a síranům [35]. Mikrosilika se do betonu může přidávat právě z těchto důvodů zlepšení vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu, ale také jako částečná náhražka cementového tmele. V technologii stříkaného betonu se mikrosilika používá spíše k výše zmíněnému zlepšení vlastností betonu v čerstvém a ztvrdlém stavu. Pokud používáme stříkaný beton bez mikrosiliky, tak se s pevností řádově dostáváme pouze na 20–30 MPa a znatelně se nám sníží vodonepropustnost, takže z tohoto hlediska je opodstatněné přidání 5–10 % mikrosiliky odvislé od hmotnosti cementu. Při použití mikrosiliky dojde ke zlepšení čerpatelnosti čerstvého betonu, z toho vyplývající menší opotřebení čerpadla a hadic na dopravu směsi, lepší lepivost betonové směsi, která má významný vliv na snížení spadu materiálu a snížení potřebného množství urychlovače, což má za následek také zvýšení pevnosti. Z hlediska trvanlivosti a odolnosti dojde k zlepšení zejména vůči alkalické reakci kyseliny křemičité a zvýšení odolnosti proti síranům. Kvůli těmto žadaným vlivům na beton je dobré využívat mikrosiliku. Při použití mikrosiliky však dochází k značnému zvýšení jemnozrnného podílu v betonové směsi a je tedy nezbytně nutné užít vyššího množství plastifikační přísady [1]. Mikrosilika má velký měrný povrch, který se pohybuje v intervalu 20 000 až 35 000 m<sup>2</sup>/kg a také má vysoký podíl SiO<sub>2</sub> (mezi 65–97 % hmotnosti) [30].

### **Další příměsi**

Z dalších příměsí je možné do stříkaného betonu použít například vysokopecní popílek. Jedná se o anorganický pucolánový materiál, jenž je zachytáván na mechanických odlučovačích. O poznání méně se do stříkaného betonu využívá mletá vysokopecní struska. Vysokopecní

struska je ve své podstatě jemně mleté latentní hydraulické pojivo. Aby bylo umožněno dosažení barevného odstínu, lze do stříkaných betonů přidávat barvicí pigmenty [30].

### **Voda**

Poměr  $v/c$  je velmi důležitý faktor z hlediska hodnocení konečné kvality stříkaného betonu. Pokud dávkuje velké množství vody a vodní součinitel se pohybuje nad hodnotou 0,5, dochází ke stékání a odpadávání naneseného betonu [30].

### **Plastifikační přísady**

Plastifikační přísady se do betonu přidávají pro zlepšení zpracovatelnosti a lepivosti čerstvého betonu. Při konstantním poměru vodního součinitele  $w = v/c$  se může zpracovatelnost výrazně zlepšit případně při stejné zpracovatelnosti se může poměr  $v/c$  výrazně snížit. Zlepšená zpracovatelnost vede k zvýšení kvality při čerpání čerstvého betonu, zatímco snížení poměru  $v/c$  vede ke znatelnému nárůstu pevnosti. V dnešní době jsou nejpožívanější plastifikační přísady na bázi ligninosulfonů, sulfítově modifikované melaminové pryskyřice a naftalenu. Naftaleny a melaminy se mohou dávkovat bez problémů, protože nepostihují beton z hlediska zpomalení tuhnutí nebo nadměrného množství vzduchových pórů. Princip ztekucování u naftalenu je na bázi nabití částic cementu, takže se tyto částice vzájemně odpuzují. Naproti tomu melamin tvoří mazací plošku na povrchu částic a lignin snižuje povrchové napětí vody [1]. Dávkování plastifikační přísady se pohybuje kolem 4–10 kg/m<sup>3</sup>, přičemž se přihlíží na požadavky na hodnotu vodního součinitele, druh cementu, druh použitých příměsí a přísad a především také na požadovanou konzistenci. V současné době se však ve velké míře používá superplastifikačních přísad na bázi polykarboxylátů, které mají oproti výše zmíněným ztekucovacím přísadám výhodu, že nezpůsobují zpomalení tvrdnutí betonu. Molekuly superplastifikačních přísad se absorbují na povrch částic cementu a zvyšují negativní náboj natolik, aby se zrna navzájem odpuzovala. Tímto jevem jsme schopni docílit velmi silné dispergace částic, která nám slouží nejenom k snížení množství záměsové vody, ale také k výraznému prodloužení zpracovatelnosti čerstvého betonu [1].

### **Přísady urychlující tuhnutí cementu**

Při využití nástřiku mokrou cestou, je vhodné přidávat přísady urychlující tuhnutí. Je to důležité z toho důvodu, že při stříkání dojde k převodu z tekutého stavu do stavu zemité vlhkosti a to vše ještě v době, kdy se beton nachází ve vzduchu. Při volbě požadavků na beton je nutné, aby se změna konzistence udála během několika sekund. Při použití urychlovačů je možné aplikovat stříkaný beton i na vertikálně umístěné plochy. Urychlovače jsou dávkovány jako tekutina a dávkuje se speciálními čerpadly, která mohou být šneková nebo například

pístová. Bohužel při použití urychlovačů dochází ke snížení konečných pevností ztvrdlého betonu a z tohoto důvodu je nevhodné nadměrné užití urychlovací přísady. Tam kde je to ovšem nutné, například na konstrukce, kde je velké riziko spadu, je vhodné použít vyšší množství než například na svislé stěny. Přísady urychlující tuhnutí mohou být na hlinitanové bázi a rozlišujeme je na hlinitan sodný a hlinitan draselný. Co se týče vlastností, při používání hlinitanu draselného ke kratším dobám tuhnutí a větším počátečním pevnostem než je tomu u urychlovače na bázi hlinitanu sodného. Běžné dávkování přísad urychlujících tuhnutí se pohybuje kolem 4–8 % z obsahu pojiva [1]. Jiné zdroje [30] udávají vyšší minimální hranici pro dávkování přísady urychlující tuhnutí (konkrétně by se dávkování mělo pohybovat v intervalu 5,5 až 8 % z hmotnosti cementu).

Přísady urychlující tuhnutí se nejčastěji používají v tekuté formě a přidávají se přímo do trysky (u mokrého způsobu nástřiku). Rovnoměrnost přidávání urychlující přísady má přitom zásadní vliv na kvalitu stříkaného betonu. Dávkování přísady urychlující tuhnutí je nutné upravovat s ohledem na různé podmínky, jako jsou například teplota směsi, teplota vzduchu a sklon podkladu [30].

#### **4.7 Dodatečné zajištění kvality povrchu**

Aby mohla být potvrzena kvalita a trvanlivost stříkaného betonu, je nutné provést průkazní zkoušky. Dokončovací vrstva se v případě jednoplášťového ostění uskutečňuje pomocí nástřiku tenké dokončovací vrstvy. Tloušťka takového nástřiku je zhruba 50 mm a stříkaný beton je bez drátků. Tato vrstva se nanáší z toho důvodu, aby byly překryty drátky, které vyčnívají z povrchu betonu konstrukční vrstvy. Povrch dokončovací vrstvy je následně ručně upravován a tím postupem je vytvořen dokonale hladký povrch ostění [35].

## **5 OSTĚNÍ Z MONOLITICKÉHO BETONU**

### **5.1 Obecně**

Na definitivní betonová ostění jsou často kladeny velmi protichůdné požadavky, ať se jedná o realizaci či průběh životnosti díla (zpracovatelnost, omezení vzniku trhlin, pokud možno co nejrychlejší nárůst pevností a odolnost proti různým vlivům). Při návrhu složení betonu pro ostění tunelu je nutno přihlédnout také ke stavu horninového masivu, ve kterém probíhá ražba, k deformaci výrubu, jenž je zajištěn dočasně pomocí primárního ostění ze stříkaného betonu a v neposlední řadě také k chemickému složení průsakových vod, jejich případné agresivitě a množství. Všechny tyto údaje jsou nutné k posouzení trvanlivost nejen primárního ostění, ale především také k definování nutné kapacity ostění sekundárního [5].

Beton je jako stavební materiál používán ve třech formách (stříkaný beton, monolitický beton a prefabrikovaný beton). Stříkaný beton je především vhodný jako primární ostění tunelů nebo jako sekundární ostění u méně náročných staveb případně se používá jako jednoplašťové ostění. Jako monolitický se beton používá výhradně pro definitivní (trvalé) ostění tunelů [2].

Na definitivní ostění je kladen důležitý požadavek na trvalou stabilitu. Při uvažování spolupůsobení primárního ostění s ostěním sekundárním je proto nutné, aby veškeré požadavky na ostění sekundární splňovalo i ostění primární [27].

### **5.2 Tunely bez hydroizolace a jejich porovnání s klasickými tunely (s mezilehlou izolací)**

V dnešní době se kvalita betonu neměří pouze normovou pevností betonu, ale jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, tak jsou na beton kladeny další požadavky z hlediska fyzikálních vlastností. Cílem této práce je docílit návrhu vodonepropustného ostění tunelu. Na takovýto návrh je třeba užití vodotěsného betonu. Jako další fyzikální požadavky na beton lze zmínit například mrazuvzdornost a trvanlivost betonu v agresivním prostředí. Dříve se vodotěsnost betonu řešila především u vodohospodářských staveb, ale v poslední době se začala tato vlastnost více řešit i u staveb, které mají za úkol odolávat proti působení spodní tlakové vody (do takovýchto konstrukcí patří i tunely). Klasické tunely jsou navrhovány s mezilehlou izolací, ale využití vodonepropustného betonu namísto klasické hydroizolace má své výhody. Mezi tyto výhody patří například minimalizace nutných pracovních postupů, další výhodnou vlastností tunelů bez hydroizolace je, že pokud dochází z nějakého důvodu

k průsakům, tak je jednodušší lokalizace a následná oprava netěsnosti. Nejdůležitější výhodou je fakt, že beton má větší životnost, než povrchové hydroizolace [21].

Tunely bez hydroizolace je vhodné používat proto, že klasické tunely s mezilehlou izolací se v minulosti nepodařilo vždy realizovat bez velmi nákladných oprav. Jakmile je totiž zbudováno sekundární ostění, tak je velmi složité dodatečně řešit hydroizolaci ostění. Dodatečná nápravná opatření jsou velmi problematická a výsledek je zajištěn až po několika pokusech. Poruchám na hydroizolacích je částečně možné předcházet. Je možné vytipovat problémová místa a těm věnovat zvýšenou pozornost. Tímto však odstraníme pouze netěsnosti, jež vznikají chybnými svary. Dalším problémům je však těžší předejít. Mezi tyto problémy lze řadit například trhliny při armování obehzdivky a jiné práce. Navíc je nutné kontrolovat, přítomnost zdvojení hydroizolační fólie v místě spár [32].

Problémy tunelů s hydroizolací je sice možné předpokládat a v rámci řešení tunelu počítat s doplňkovým pojistným injekčním systémem. Tento systém je pak v rámci potřeby možno snadno aktivovat a eliminovat tak nežádoucí průsaky. Mezi nevýhody tunelu s vloženou hydroizolací je nutné také započítat náročnost na kvalitu podkladu, nutnost dodržení technologie kladení a důkladné provedení spojů. Pokud k těmto problémům navíc započítáme náklady na pojistnou izolaci a již výše zmíněnou menší trvanlivost, lze dojít k závěru, že je vhodnější provedení tunelu bez hydroizolace (kde hydroizolační funkci neplní fólie, ale beton) [33], [21].

### **5.3 Transport vlhkosti v betonu**

Co se vodonepropustnosti betonu týče, je odvislá od velikosti otevřených pórů v betonu a jejich objemového zastoupení. Otevřené póry jsou v betonu prakticky totožné s kapilárními póry, jenž vznikají odpařováním záměsové vody. Jelikož dochází buď k minimálnímu transportu vlhkosti, tak za vodotěsný považujeme beton, na jehož vzdušné straně nedochází k viditelným průsakům [21].

Co se týče vzdušné strany, tak ta zůstává pořád suchá, neboť při běžně uvažovaném větrání je vzduch schopen všechnu vlhkost odvést. Vodotěsnost je však nutno prokázat zkouškou hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8. Pro použití betonu v tunelech je však tato zkouška málo přísná a proto je vhodnější užití jiné zkušební metody s přísnějšími požadavky na beton. Tato problematika bude nadále probírána v následujících kapitolách [21].

## 5.4 Vodonepropustnost

Co se týče vodonepropustnosti monolitického betonu, je velmi důležité navrhnout správnou recepturu. Dle třídy požadavků by nemělo docházet k plošnému průsaku a měl by se co možno nejvíce eliminovat vznik trhlin v betonu. Rozvoj trhlin souvisí se smrštěním betonu, snížením obsahu cementu, záměsové vody a také ve správném návrhu vyztužení. Další možností omezení vzniku trhlin je použití betonu, jenž má snížený vývin hydratačního tepla a jeho následné správné ošetřování. Omezit rozvoj trhlin je také možno využitím rozptýlené výztuže, kterou do betonu přidáváme buď jako doplněk výztuže nebo jako náhradu. Dalšími vlivy můžou být návrh konstrukce a její provedení. Z tohoto je nejdůležitější návrh dilatačních, pracovních a smršťovacích spár [4].

Ostění z vodonepropustného betonu nám zajišťuje vodonepropustnost i bez použití mezilehlé izolace. Zajištění nepropustnosti betonu, myšleno jako materiálu, není obecně problém. Zásadní problém je však v dodržení ostatních požadavků již výše zmíněných v předchozím odstavci (maximální velikost trhlin). Tyto požadavky většinou vedou ke zvýšení stupně vyztužení ostění. Na druhou stranu je výhodou, že ostění není příliš náchylné k mechanickému poškození, jako tomu bývá u fóliových izolací [5]. Z toho důvodu není takové riziko, že by přitékala voda do tunelu v průběhu užívání. Ostění z vodonepropustného betonu jsou v současné době nejvíce oblíbená v Německu a Rakousku, kde byla využita při stavbě hned několika tunelů. Jako příklad lze uvést tunely německých drah Neubaustrecke Koln-Rheub/Main-Elzgergerg. V poslední době se však jedná o celosvětový trend vývoje betonování tunelů. Proto takovýto druh ostění je jistě i do budoucna vhodný pro stavbu některého uvažovaného českého dopravního tunelu. Vodonepropustného ostění bylo v České republice využito při betonáži tunelového komplexu Blanka, ale pouze na vzduchotechnickém kanále a na šachtě pod výdechovým otvorem Nad Octárnou [18].

Beton v České republice je vyráběn dle normy ČSN EN 206-1, ale ze specifikace betonu dle této normy není možné určit, zdali se jedná o beton určený pro masivní konstrukci nebo konstrukci vodonepropustnou. Z normy je možné vyčíst požadavky na maximální průsak tlakovou vodou (ČSN EN 12390-8), ale patří to spíše do aspektů trvanlivosti betonu. To, že je splněna maximální hodnota průsaku však neznamená, že se jedná o beton, který je vhodný pro využití ve vodonepropustné konstrukci. Kromě specifikace na průsak tlakovou vodou je nutno také vymežit smrštění betonu, protože co se týče vodonepropustnosti, tak jsou největším rizikem právě trhliny. Obzvláště u masivních konstrukcí je třeba dbát na nízký vývin hydratačního tepla betonu a také na průběhy teploty [3].



Pokud budeme uvažovat nad návrhem záměsi vhodné pro některé ze tříd agresivního prostředí, musíme se také řídit betonářskou normou ČSN EN 206-1. Při návrhu zařazení konstrukce do některé ze tříd agresivity prostředí je vhodné brát v potaz provozní podmínky, jako je například používání rozmrazovacích prostředků. Z druhé strany je však velmi ekonomické zvažovat vlivy pozitivní, jako je například další ochrana betonu nátěrem. Jako velmi vhodnou možnost pro české tunely lze doporučit beton C25/30 XF2. Zařazení do vyšší třídy XF4 nebo do třídy agresivity prostředí XD3 je většinou neopodstatněné (za předpokladu využití ochranných dodatečných nátěrů na beton) [5]. Z jiné literatury [21] je však nutné doplnění, že při zvýšené chemické agresivitě pro stupně vlivu prostředí XA1 a XA2 je doporučeno používat beton třídy C30/37. Takovýto beton by měl vyhovět všem požadavkům na tyto uvedené stupně prostředí, přičemž je bezpodmínečně nutné, aby byl zkontrolován maximální přípustný vodní součinitel a minimální dávka cementu. Je požadováno, aby beton pro vodonepropustná ostění byl minimálně v pevnostní třídě C30/37 [27]. Pokud je však nutno zařadit beton do třídy XA3, kde je obsah  $\text{SO}_4^{2-} > 600 \text{ mg/l}$ , je nutné použít síranovzdorný cement. Při rozhodování o požadavcích na odolnost proti některé ze tříd agresivity prostředí je v neposlední řadě vhodné využít také zkušeností zemí, které mají za sebou rozsáhlou výstavbu tunelů (Rakousko, Německo či Itálie) [5].

Zásadním problémem při navrhování záměsi je množství cementu, protože množství cementu dané specifikací TP ČSB 02 (bílé vany – vodotěsné betonové konstrukce) je menší, než je požadované množství u ČSN EN 206-1. Je to z toho důvodu, že v poslední době se v projektech vyskytují i normalizované betony s označením BS 1-3. Pro tyto betony je stanoveno jasné složení, ale protože se jedná o překlad rakouské normy, tak požadavky kolidují s ČSN EN 206-1. Pro porovnání byl využit předpoklad z minulého odstavce, aby se používaly znalosti, případně normy ze zemí, ve kterých je větší zkušenost se stavbou tunelů. Betony jsou však certifikovány dle této normy a není tedy možné dodržet množství cementu [3].

TP ČBS se přímo zabývá problematikou tzv. „Bílých van“. V podstatě se jedná o konstrukce, které mají kromě přenášení zatížení i úlohu těsnit a chránit proti podzemní vodě. Tato směrnice staví právě na vodotěsnosti betonu, která je založena především na eliminaci vzniku trhlin, snahou rozdělit vzniklé trhliny pomocí vhodné výztuže tak, aby trhliny zůstaly malé a byly malé pokud možno i průsaky vody a tím byly splněny požadavky na vodotěsnost [4].

## 5.5 Návrh složení betonu

Při navrhování betonové směsi je nutné, aby byly stanoveny cíle, které musí být splněny. Musí být stanovena požadovaná pevnost betonu a také odolnost proti třídě agresivity prostředí. Dále pak musí být specifikován náběh pevností. Tento náběh je odvislý od požadovaného času pro odbednění ostění. Aby byla odstraněna vlastní pnutí v betonu, tak musí být stanoven požadavek na co nejmenší vývin hydratačního tepla. Tímto předcházíme vzniku nežádoucích trhlin v konstrukci ostění. Požadavky na trhliny jsou v tomto případě oprávněné, protože tento typ ostění má také hydroizolační funkci. Při vzniku trhlin by byla vodonepropustnost ostění ohrožena. Dále je nutné stanovit požadavky, které omezují smršťování betonu, případně opatření zvyšující odolnost betonu proti vzniku trhlin v raných stádiích betonu [43], [4].

Kromě požadavku na omezení napětí od teploty a od smršťování jsou tu ale i požadavky na konstrukční opatření, které zahrnuje návrh výztuže tak, aby bylo co nejvíce možno zamezeno tvorbě trhlin a stavebně technickým požadavkům, které zahrnují požadavky na vhodnou dobu odbednění a začátek ošetřování [4].

Při návrhu složení betonu je také nutné brát ohled na to, aby výsledný čerstvý beton vykazoval velmi dobrou zpracovatelnost, co nejmenší odlučování vody a také, aby byla pokud možno co nejvíce hutná [4].

## 5.6 Třída pevnosti betonu

Výběr třídy pevnosti betonu provádíme dle požadavků ze statického výpočtu. Platí však, že minimální požadavky na třídu pevnosti betonu jsou C20/25 dle ČSN EN 206-1 [7]. Při uvažování vodonepropustného ostění je však nutné požadovat beton minimální třídy C30/37, přičemž se uvádí, že by bylo vhodnější využití betonu provzdušněného [27].

Co se týče pevnosti při odbedňování, tak by neměla být zvolena moc vysoká, protože v tu chvíli by byla i příliš velká náchylnost ke vzniku trhlin. Z tohoto důvodu by se měla pevnost po 12 až 14 hodinách pohybovat v intervalu 1,5 až 3,0 MPa. S hodnotou odbedňovací pevnosti 3,0 MPa souhlasí i zdroj [46]. Vhodné je však doplnění, že z hlediska mechanického zatížení postačuje tato relativně malá pevnost betonu. Při započítání dalšího zatížení například od změny teploty požadavek na hodnotu odbedňovací pevnosti nereálně roste. Proto tato literatura udává, že je vhodné, aby byl nalezen vhodný kompromis [43].

Nicméně v literaturách, které popisují projekty betonáže ostění, se často vyskytují tvrzení, že pevnost při odbedňování by se měla pohybovat v intervalu 10–15 MPa [47], [48].

Je vhodné, aby byla kontrolována pevnost u odebraných vzorků betonu po 7 dnech. Z tohoto důvodu bude v rámci experimentu provedeno stanovení pevností betonu po 7 a 28 dnech [7].

## 5.7 Teplotní rizika pro vodonepropustná ostění

Aby byly splněny veškeré požadavky na beton, je třeba navrhovat složení betonu takovým způsobem, abychom splnili požadované vlastnosti, ale zároveň navrhli co nejmenší množství pojiva a vody a snížili tak co nejvíce nežádoucí hydratační teplo [4].

Pro snížení hydratačního tepla je vhodné použití cementů, které neobsahují trikalciumaluminát ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tento slínkový minerál totiž vyvíjí velké hydratační teplo ihned po zamíchání cementu s vodou. Tento minerál však také dává malé pevnosti, proto je lepší, aby ho cement obsahoval co možná nejméně [4].

Při požadavcích na výběr cementu je také nutné zohlednit požadavky na třídu agresivity. Výhodou výše zmíněných cementů bez trikalciumaluminátu je také to, že vykazují zvýšenou odolnost proti síranům. Tato informace ve spojení s tím, že dávají nízké hydratační teplo, vypovídá o tom, že tyto cementy (s malým nebo pokud možno žádným množstvím trikalciumaluminátu) jsou nejvhodnější pro použití na vodonepropustná sekundární ostění tunelů [7].

Protože se však u nás cementy bez trikalciumaluminátu neprodávají, je nutno navrhnout velmi vhodnou variantu v podobě užití portlandských cementů směsných (CEM II), případně část cementu lze nahradit jinými hydraulicky působícími přísadami [4], [43]. Co se týče cementů, je nejlepší používat mlecí přísady, které jsou velmi jemně mleté. Tyto velmi jemně mleté přísady totiž zlepšují zpracovatelnost a také se podílejí na zvýšení vodonepropustnosti ztvrdlého betonu [7]. Je doporučeno, aby jako nejčastější a také ve většině případů nejvhodnější hydraulickou přísadou byl popílek. Mezi jeho kladné vlastnosti patří také to, že zlepšuje zpracovatelnost, redukuje nebezpečí odměšování a krvácení betonu, snižuje potřebné množství cementu do betonu a tím také snižuje vývin hydratačního tepla. Zahraniční zdroje uvádí, že pro správnou funkci vodonepropustného ostění je možný přírůstek popílku více než 60 kg na 1 m<sup>3</sup> čerstvého betonu [17].

Teplota betonu by se dala vyjádřit v závislosti na jednotlivých parametrech, které jí ovlivňují. Mezi tyto parametry patří především již zmíněné hydratační teplo. Jako další parametry, které se výrazněji podílí na výsledné teplotě betonu lze jmenovat teplotu čerstvého betonu, parametry konstrukce a teplota vzduchu. Pro zachování vodonepropustnosti betonu je žádoucí, aby byla zachována co možná nejnížší teplota betonu [7].

Teplota čerstvého betonu by se měla pohybovat v intervalu od 10 °C do 27 °C. Je to z toho důvodu, že při teplotách pod 10 °C dochází ke zpomalení tuhnutí a také ke zpomalenému nárůstu pevností. Naproti tomu betony, které mají teploty vyšší, než 27 °C jsou náchylnější na tvorbu trhlinek. Absolutní teplota čerstvého betonu by neměla překračovat hodnotu +70 °C a teplotní spád mezi povrchem betonu a středem ostění musí být menší než 20 °C [18]. Jiné zdroje [27] uvádějí, že beton v ostění by neměl překračovat teplotu 45 °C a také to, že by beton při ukládání měl splňovat maximální teplotu 20 °C. Pokud tyto podmínky nejsou splněny, tak by měla být přijata speciální opatření. V některých případech je požadováno, že teplota betonu nesmí překročit 25 °C s tím, že jako doporučená hodnota teploty čerstvého betonu (čerstvé směsi) je 18 °C. Vzhledem k tomu, že v zahraničí mají s tímto typem ostění větší zkušenosti, bych tedy doporučoval, aby za maximální přípustnou teplotu byly považovány tyto parametry [17].

## **5.8 Popílek, jeho vlastnosti a vliv na trvanlivost betonu**

Popílek je jemný prášek, který je nerostným zbytkem po vysokoteplotním spalování uhlí. Vzhledem k menšímu rozptýlu vlastností by bylo vhodnější použití popílku, jenž vznikl spalováním černého uhlí. Ovšem jak udává zdroj [25], většina popílku (řádově 80 %) vzniklého u nás pochází ze spalování hnědého uhlí. Vzniká při teplotách 1400–1600 °C a je zachycován na mechanických či elektrostatických odlučovačích. Typ odlučovače má vliv na zrnitost popílku. Popílek zachycený na mechanických odlučovačích je obvykle hrubší (obsahuje více jak 20 % zrn větších jak 0,09 mm) než popílek, jenž byl zachycen na elektrostatických odlučovačích (obsahuje méně jak 20 % zrn větších jak 0,09 mm) [25]. Hlavní existující fáze v popílku jsou amorfni  $\text{SiO}_2$  a mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) [26]. Amorfni sklovitá fáze zásadně ovlivňuje reaktivitu popílku. Protože se v podstatě jedná o odpad vzniklý spalováním, je nutné počítat s jeho proměnlivými vlastnostmi a složením. Popílek je možné využít jako příměs I druhu (fíler), ale v případě návrhu složení betonu, pro vodonepropustné ostění tunelu budeme popílek uvažovat jako aktivní příměs II druhu (pucolán), kde posuzujeme popílek dle ČSN EN 450 – 1 (Popílek do betonu. Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody). Pucolanita u popílku znamená, že při přidání vody nereaguje, ale ve spojení s hydroxidem vápenatým začíná reagovat a vytváří stejné hydratační produkty jako cement. Je však všeobecně známo, že popílek reaguje pomaleji než cement a z toho důvodu můžeme nahradit pouze část cementu (zhruba 10–30%). Popílek ve spojení s cementem nám však pomáhá snižovat hydratační teplo (použití směsných cementů) a proto je důležitou součástí betonu pro vodonepropustná betonová ostění tunelů [25].

Při použití popílku však dochází ke snižování pevností betonu (především sedmidenních pevností) [26]. Některé literatury [25] se zmiňují o nevhodnosti použití popílku, či nutnosti ověření popílku spolu s definováním tvrdých omezení na maximální vodní součinitel a minimální množství cementu (tato omezení je možná pro určité typy popílku zjistit z normy ČSN EN 450). Toto vše zdůvodňují splněním podmínek pro navrženou trvanlivost betonu. Nové výzkumy [26] však naopak prokazují, že z hlediska trvanlivosti betonu při působení cyklického zmrazování jsou naopak betony s popílky odolnější. Při používání popílků totiž dochází k tvorbě reakčních produktů (CSH gelů), které redukuje kapilární pórovitost. Lze rovněž poznamenat, že pokles difuze chloridových iontů jde v ruku v ruce se zvyšující se dávkou popílku, který byl použit při výrobě betonu. Popílek má menší částice než cement a to také umožňuje dobrý vývoj pucolánových vlastností [26].

## **5.9 Omezení vzniku trhlin**

Pokud nepočítáme trhliny v betonu, které vznikly působením vnějších zatížení, jsou tu již výše zmíněné trhliny od vynuceného vnitřního napětí, které vzniklo jako důsledek zamezení dilatačního zkrácení při ochlazování betonu a v případě smršťování. Pro betonáž jsou tedy nejvíce vhodné betony, které dávají malé hydratační teplo při tvrdnutí a obsahují pokud možno co nejméně pojiva. Pomocí vhodného ošetřování betonu je možné docílit zmenšení napětí, které bylo vyvoláno teplotními změnami případně smršťováním. Dalšímu zamezení tvorby trhlin lze zabránit také tím, že budeme odbedňovat při minimálním rozdílu teplot mezi povrchem betonu a okolním prostředím [4].

Je vhodné, aby odbednění proběhlo pokud možno co nejpozději. Pokud bychom požadovali dodržení 24 hodinového cyklu betonáže pro jeden záběr, pohybuje se odbedňovací doba pro tento jeden záběr kolem 12 až 14 hodin. Pokud by bylo nutné tuto dobu zkrátit, je nutné použít speciálních metod, které zabrání rychlému ochlazení betonu. Tato opatření jsou obvykle kladena kvůli zamezení proudění vzduchu, kterému lze zabránit tím, že uzavřeme portál. Tímto se dá také účinně zabránit vzniku trhlin [7].

Eliminací trhlin nebo jejich minimalizováním zabezpečíme správnou funkčnost vodonepropustného ostění tunelu. Z hlediska objemových změn je možné trhliny rozdělit na trhliny od plastického smrštění, trhliny od autogenního smrštění a trhliny od smrštění z vysychání. Rozdíl mezi smrštěním plastickým a smrštěním z vysychání je v tom, že při plastickém smrštění je ještě materiál v plastickém stavu a tedy nemá dostatečnou schopnost odolávat objemovým změnám. Z tohoto důvodu na materiálu vznikají trhliny. Pokud má beton nízký vodní součinitel nebo se nachází v suchém větrném počasí, je ho nutno chránit

před tímto plastickým smrštěním. Autogenní smrštění a trhliny od smrštění z vysychání dohromady tvoří smrštění dlouhodobé. Pro betony lze obecně konstatovat, že čím mají vyšší pevnostní třídu, tím zaujímá autogenní smrštění větší podíl na celkovém vysychání. Z tohoto důvodu je nejlepší používat betony, které mají část dlouhodobého smrštění omezenou již svým složením. Pro sledování smrštění betonu je vhodné používat tenzometry, které se osadí na zkušební tělesa nejlépe ihned po dokončení betonáže. Díky tomuto brzkému osazení nedochází ke zkreslení výsledků z důvodu pozdního počátku měření [6].

Další možností vzniku trhlin jsou trhliny od teplotního rozdílu mezi povrchem konstrukce a jádrem konstrukce (od teplotního gradientu). Při velkém rozdílu teplot (při velkém teplotním gradientu) vzniká v betonu pnutí, které zapříčiňuje vznik trhlinek. Největší vliv na velikost tohoto teplotního gradientu má velikost hydratačního tepla betonu. Z tohoto důvodu by správné složení betonu mělo být takové, aby beton vyvíjel co nejméně tepla [6]. Těmito popsanými postupy je nutné omezit tvorbu trhlin, která je v případě použití betonu pro vodonepropustná ostění velice nežádoucí a maximální povolená šířka trhlin by měla být do 0,25 mm, přičemž této hodnoty by mělo být dosaženo v podélném i v příčném směru [18].

### **5.10 Vodonepropustná sekundární ostění tunelů**

Jako vodonepropustné sekundární ostění si můžeme představit stavební prvek, jenž je vodonepropustný. Za vodonepropustné sekundární ostění lze prvek prohlásit v případě, že se na vnitřní straně vyskytují maximálně ojediněle lehce vlhká místa. Pod pojmem *Lehce vlhké místo* si lze představit vlhké skvrny na betonu, místní změna barvy betonu vlivem navlhnutí, případně malé skvrnky zasychající do 20 minut. Pokud beton obsahuje větší dutiny, které umožňují pohyb vody, je nutné provést dodatečnou injektáž [7].

### **5.11 Odolnost proti průsaku tlakové vody**

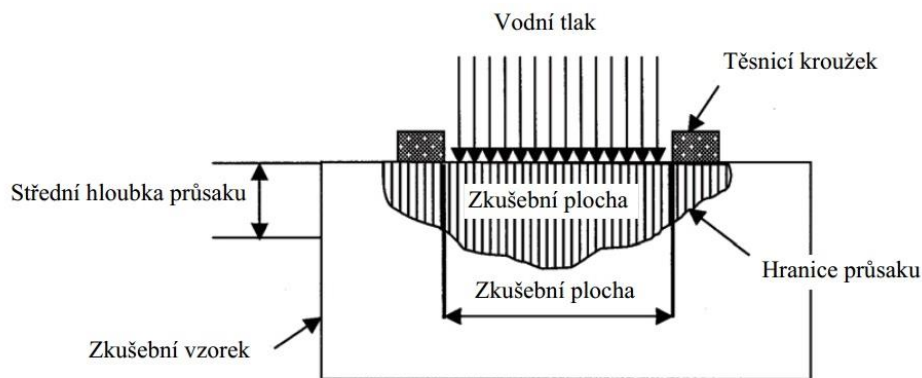
Protože potřebujeme, aby tunel splňoval navrhovanou živostnost, musíme zajistit, aby byl beton odolný proti průsaku tlakovou vodou. Abychom dosáhli požadovaných parametrů, je vhodné přidání přísad. Pokud by bylo současně působení nějakých chemikálií, dojde k také ke zpomalení vniku nežádoucích chemických látek. Odolnost proti průsaku se provádí na již ztuhlém betonu. Jako základní požadavek je odolnost betonu při tlaku 0,7 MPa. Při tomto tlaku vody musí splnit nejvyšší možnou přípustnou střední hloubku průsaku 25 mm [7].

Pokud investor neurčí jinak, používá se k testování níže popsaná metodika ve smyslu ČSN EN 206-1. Tato metodika odpovídá normě ÖNORM B3303 Betonprüfung (zkoušení betonu).

Zkušební tělesa o rozměrech  $200 \times 200 \times 120$  mm případně o rozměrech  $300 \times 300 \times 200$  mm se zkouší tlakem, který by měl odpovídat uvažovanému reálnému tlaku, který bude působit na konstrukci ostění, vynásobenému hodnotou 1,5 kvůli bezpečnosti. Jako minimum je však stanoveno 0,7 MPa. Tlak vody působí na část zkoušeného tělesa, konkrétně na kruhovou část o průměru 100 mm. Tato plocha je vymezena těsnícím kroužkem. Tato zkouška se provádí na zkušebním tělese ve stáří 28 dnů. Před prováděním zkoušky je nutné tělesa dát do vodního uložení. Vzorky, které byly získány z reálné stavby, stačí dát do vodního uložení nejpozději 7 dnů před zkoušením zkušebních vzorků. Minimální doba trvání zkoušky je 14 dní. Tato doba trvání zkoušky je však rozdělena do dvou fází. Při první fázi je zkušební těleso pod tlakem vodního sloupce, jenž odpovídá 25 % maximálnímu tlaku. Tato první fáze trvá 3 dny. Při druhé fázi dojde ke zvýšení tlaku na maximum, které bylo určeno jako 1,5 násobek předpokládaného tlaku na reálnou konstrukci, minimálně však 0,7 MPa. Toto působení tlaku je již konečné a tento tlak se nechává na těleso působit až do konce zkoušky. Doba trvání této fáze je tedy 11 dní [7].

Po ukončení působení tlakové vody je těleso rozříznuto dvěma řezy tak, abychom mohli určit střední hodnoty hloubky průsaku. Celková hloubka průsaku je definována jako střední hodnota z minimálně tří středních hodnot (zkouška se tedy provádí s minimálně třemi zkušebními tělesy) zkoušek odolnosti proti průsaku tlakové vody [7].

Pro názornost slouží obr. č. 1.



Obr. 1: Zkušební metoda na hloubku průsaku [15].

## 5.12 Beton vodotěsného sekundárního ostění bez izolace

Při uvažování trvalého sekundárního ostění jako i zároveň vodotěsného ostění bez izolace, je třeba brát ohled na to, že beton musí plně přebrat funkci izolace. Na beton tedy nejsou kladeny jenom požadavky proti průsaku tlakové vody. Tento požadavek je pouze jedním z několika požadavků na vodonepropustnost betonové struktury. Další z požadavků je také

to, aby beton nevykazoval trhliny, které by vedly vodu. Problematika trhlin je podrobněji popsána v kapitole s názvem Omezení vzniku trhlin [7].

### **5.13 Mrazuvzdornost**

Ve vzdálenosti 1000 m od portálu je navíc nutné prokázat odolnost betonu proti působení mrazu. Beton musí vyhovět na minimálně 100 cyklů. Obecně však platí, že u vodonepropustného ostění, kde je použito spousta příměsí a provzdušňujících přísad tuto mrazuvzdornost zaručuje [7].

I přes to je však nutné zkouškou prokázat vhodnost betonu. Stanovení mrazuvzdornosti betonu se v našich podmínkách provádí dle ČSN EN 73 1322. Podstatou zkoušky je střídavé zmrazování a rozmrazování zkušebních vzorků. Dle stupně vlivu prostředí je dán minimální počet cyklů, na který má daný vzorek vyhovět (kolikrát se má vzorek zmrazit a poté rozmrazit) [7].

Jako zkušební tělesa se používají trámce, jenž mají čtvercový průřez. Jsou to tytéž trámce, které se používají pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu. Pro každou zmrazovací etapu je třeba zhotovit jednu sadu trámců, které čítá nejméně 3 kusy zkušebních těles [7]. Jako výsledek zkoušky se uvádějí zjištěné hmotnostní úbytky trámců v % a součinitel mrazuvzdornosti pro pevnost v tahu za ohybu po ukončení zkoušky [8].

Mnohem častěji používanou zkouškou trvanlivosti je stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle ČSN 73 1326, metoda A nebo C. Princip zkoušky obecně je takový, že se používá automatického zařízení k cyklování mezi kladnými a zápornými teplotami, jenž působí na zkušební těleso. Zkušební povrch je vymezen objímkou a do ní je nalit 3% roztok NaCl, nebo je zkušební těleso přímo částečně ponořeno do rozmrazovacího roztoku. Zkouší se horní povrch tělesa. Jako výsledek zkoušky slouží hodnota odloučeného materiálu po 25 cyklech. Po provedení požadovaného množství zkušebních cyklů se hmotnostní odpady sečtou a výsledek se vyjádří jako hodnota odpadu v  $\text{g/m}^2$  [9].

### **5.14 Odolnost betonu proti síranům**

Protože u sekundárního ostění nelze provést dodatečnou ochranu proti působení síranových vod, které se vyskytují v horninovém masívu, je třeba provést opatření již při náznaku podezření, že k vlivu síranů na ostění dochází. Jestliže je navrhován tunel, který prochází městem, je vhodné, aby bylo prováděno ostění z betonu, který je odolný proti síranům [7].



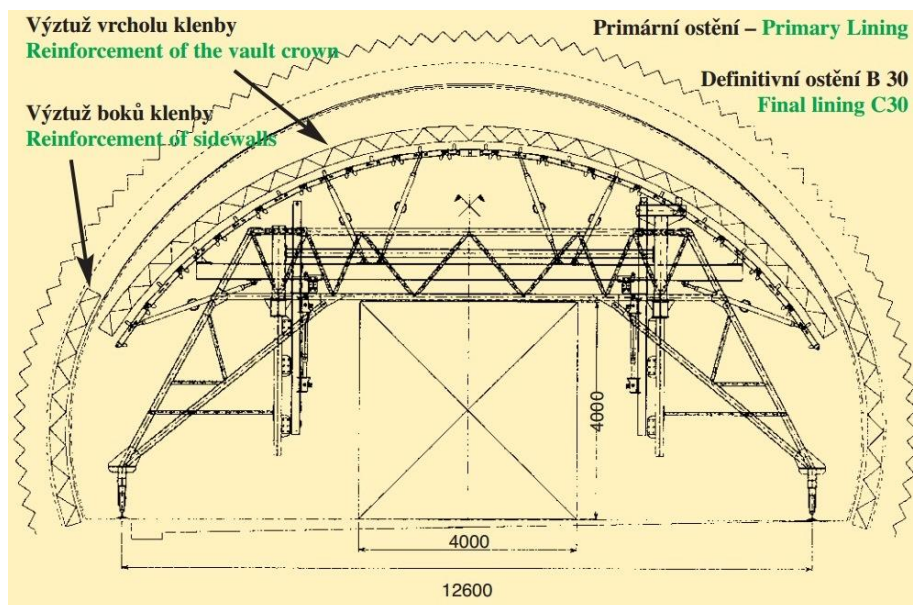
## 5.15 Výztuž v betonu

Pro sekundární ostění, které má izolaci proti vodě a beton tedy není navrhován jako vodonepropustný se výztuž běžně nenavrhuje. Výjimku tvoří případy, že je výztuž nezbytná ze statických důvodů [7].

U sekundárního vodonepropustného ostění tunelu je nutné, aby byla navržena výztuž. Navíc musí být počítáno se speciální přídavnou výztuží, která má za úkol zamezit vzniku trhlin a tím porušení vodonepropustnosti stavby [7], [27]. Pro pokládku výztuže lze použít například ukládací vůz (montážní plošinu).

### Ukládací vůz

Tento vůz se skládá z pojezdové a zvedací části. Pojezdová část zajišťuje přesun vozu mezi jednotlivými pracovními postupy a také přesné umístění výztuže v podélném směru osy tunelu. Pojezdová část je tvořena prostorovým ocelovým rámem a podvozkem s mechanickým pohonem. Rám je portálového tvaru a umožňuje tedy průjezd vozidel. Díky tomuto průjezdu je možné dovážet výztuž před ukládací vůz (ukázka průjezdu je na obr. č. 2, kde je vůz ve spodní poloze). Doprava materiálu (výztuže) je uskutečněna přímo z výroby až před ukládací vůz podle návrhu logistického centra. Je nutné, aby v jedné dodávce byla veškerá výztuž, která je potřebná pro provedení jednoho pasu (pracovního záběru) Průjezd navíc umožňuje možnost ražby tunelu před ukládacím vozem, aniž by docházelo k časovým ztrátám. Konstrukce ukládacího vozu dále obsahuje lešení a plošiny, jež umožňují pohyb pracovníků při pokládce výztuže (pokládka výztuže viz obr. č. 3). Na rámu jsou umístěny hydraulické zvedáky, na kterých je namontována zvedací část ukládacího vozu. Tyto zvedáky umožňují dvě polohy. Spodní poloha nám slouží k přejezdu vozu do části nového pracovního postupu a také pro naložení výztuže na ukládací vůz. Výztuž se na vůz ukládá shora pomocí hydraulické ruky. Tato ruka je umístěna na pojezdové části ukládacího vozu. Poté, co je již výztuž umístěna na ukládacím voze, dochází ke zvednutí do horní polohy, která je předepsána projektem. Aby bylo ustanovení vozu do potřebné výšky co nejvíce přesné, používají se šnekové převody. Následně dochází ke kompletaci výztuže. Po tomto kroku je již výztuž samonosná. Následně tedy dojde k poklesu do dolní polohy a pojezdu ukládacího vozu do místa nového pracovního postupu [36]. Montáž výztuže tedy probíhá po jednotlivých dilatačních celcích o délce pasu maximálně 10 m. Větší délku již není možné použít (viz kapitola ukládání betonu).



Obr. 2: Řez ukládacím vozem ve spodní poloze [37].



Obr. 3: Montáž výztuže sekundárního ostění [38].

## 5.16 Zpracovatelnost betonu

Konzistenci betonu je nutno přizpůsobovat pro jednotlivé typy ukládání a zároveň respektovat požadavek na co nejmenší smrštění betonu. Dle Önorm B 4710-1, část 5.4.1 (Beton – Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis; Beton – Část 1:

specifikace, výroba, používání a ověřování shody), je minimální vhodná doporučená konzistence F45 (jedná se o rozliti odpovídající hodnotě  $45 \pm 3$  cm). Pokud bychom chtěli použít měkčí konzistenci, je vhodné provést průkazní zkoušku pro tento typ konzistence betonu [4].

Pro zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu je doporučeno přidávat plastifikační přísady. Zpomalovací přísady je možné přidávat pouze do již připraveného betonu a to pouze ve výjimečných případech [17]. Zpomalovací přísady totiž snižují počáteční pevnosti (jednodenní) a také zrychlují smršťování a dotvarování betonu. Je třeba také dávat pozor na konzistenci a obsah vzduchu v betonu, protože tyto aspekty jsou také ovlivněny zpomalovacími přísadami [45].

### **5.17 Doprava betonu**

Beton by měl být dopraven na staveniště dokonale promíchaný, měl by obsahovat veškeré plnivo, pojivo, přísady, příměsi a vodu v požadovaném složení a v požadované konzistenci. Z těchto důvodů je nutné, aby byl beton přepravován pouze ve vozidlech, jež jsou určena k tomuto způsobu dopravy. Beton by měl být při dopravě chráněn proti atmosférickým vlivům, aby se například z důvodu srážek nezvýšil vodní součinitel nebo naopak nedošlo k nežádoucímu vysušování [4].

Pokud z nějakého důvodu dojde ke vzniku nežádoucí konzistence, je možné tuto konzistenci upravit za pomoci přidání vhodné plastifikační přísady do míchačky. Toto je však možné pouze v případě, že byla vyzkoušena kompatibilita plastifikační přísady s ostatními složkami betonu [4].

### **5.18 Ukládání betonu**

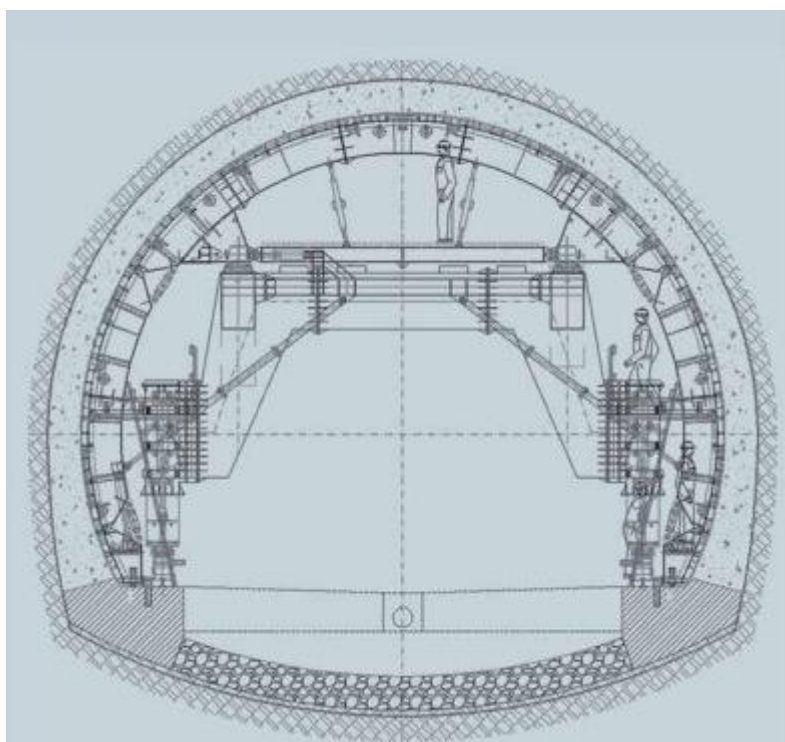
Je nezbytně nutné, aby ukládání betonové směsi probíhalo kontinuálně, tedy pokud možno bez přerušování. Betonuje se po pasech, které jsou dlouhé 5 až 12,5 m. Při uvažování vodonepropustného ostění dochází ke zkrácení délky pasu na 10 m. Z hlediska technologie betonáže je také důležité, aby pracovní spára byla pokud možno kolmá ke směru uvažovaného tlaku na ostění. Aby nedošlo k estetickým vadám na povrchu, je nezbytné používat takové odbedňovací prostředky, jež neovlivňují povrch betonu [27].

Beton se ukládá do ocelového bednicího vozu. Při výběru bednicího vozu je nutné, aby byly brány v úvahu průjezdní a průchozí profily. Bednicí vozy musí být opatřeny šroubovými zvedáky, aby mohli být prováděny případné nutné korekce [27].

### 5.19 Bednicí vozy

Ocelový bednicí vůz je určen jak pro tunely zhotovené ražením, tak i pro tunely hloubené. Nejčastěji se vyrábí tak, aby splnil požadavky pro tunely, které mají vnitřní poloměr v rozmezí 4 až 8 m. Ocelový bednicí vůz kopíruje tvar tunelu a také kopíruje jeho poloměr zakřivení. Délku vozu lze upravit dle uvažované délky pasu. Vzhledem k tomu, že se uvažuje venkovní užívání, je nezbytné, aby byla celá konstrukce chráněna nátěrem, který zabraňuje vzniku koroze [28].

Pro názornost slouží obr. č. 4.



*Obr. 4: Řez bednicím vozem [29].*

### 5.20 Ošetřování betonu

Poté, co dojde k odbednění sekundárního ostění, je nutné začít s ošetřováním betonu. Beton se ošetřuje vlhčením po dobu jednoho týdne. V případě vodonepropustného ostění je vhodné, aby byl sledován vývoj hydratačního tepla. U vodonepropustného betonového ostění je nutnou podmínkou aby za bednicím vozem následoval v závěsu i ošetřovací vůz. Takovéto ošetřování musí být prováděno nejméně tři dny po odbednění [27].

### 5.21 Požadavky na povrch ostění betonu

Co se týče požadavků na povrch ostění, tak beton musí splňovat následující požadavky: musí být homogenní, hutný a na viditelné straně se nesmí objevovat hnízda. Dále musí být povrch

proveden tak, aby ostění nevyžadovalo další nutná opatření z hlediska pohledových úprav (drsnot a nerovnoměrnost povrchu). Povrch ostění by neměl umožňovat průnik nečistot do betonu a měl by být snadno udržovatelný (čistění tlakovou vodou a drhnutí kartáči, za současného používání saponátů) [27].

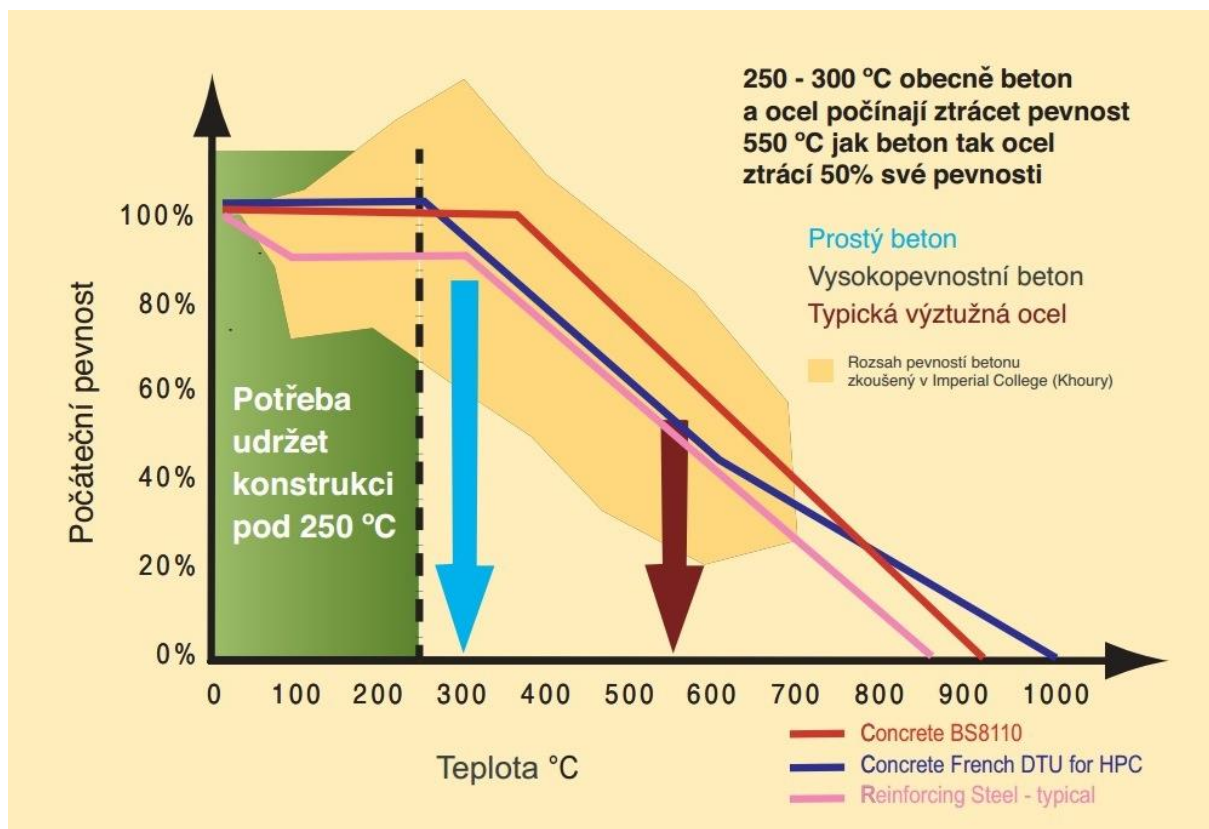
Rozdíl při posuzování povrchů betonu u ostění s mezilehlou izolací a ostění, jež plní vodonepropustnou funkci, je v tom, že ostění s hydroizolací nemá výztuž se statickou funkcí a tedy je možné, aby se na povrchu ojediněle vyskytovaly dutiny, jež však smějí zasahovat do maximální hloubky 20 mm. U vodonepropustného ostění je nutné tento požadavek zpřísnit, povoleny jsou tedy pouze dutiny, jejichž hloubka je maximálně 5 mm. Omezena je také maximální plocha dutiny, která je stanovena na  $1 \text{ cm}^2$  [27].

Pokud je nutné provádět dodatečné opravy povrchu ostění, je vhodné, aby tyto opravy byly provedeny ihned po odbednění ostění. Po odbednění se dále upravuje líc konstrukce tak, že se odstraňují a zajišťují výčnělky betonu, jež vznikly od spár bednění [27].

## **5.22 Požární odolnost betonu**

Beton je považován za nehořlavý materiál. Pokud je však vystaven působení vysokých teplot, začíná se chovat problematicky. Pokud je vystaven teplotě  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , tak začíná ztrácet na své pevnosti. Jako příklad lze uvést, že pokles na poloviční hodnoty pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu u betonu dojde při již při působení  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [34].

Beton, který se používá na vodonepropustná betonová ostění, musí být velmi kvalitní. Od ostění byla dříve očekávaná životnost 50 let, v dnešní době se však již očekává návrhová životnost 100 let. Z tohoto důvodu je nutné poznamenat, že čím je beton kvalitnější, tím hůře se chová při požáru. Navíc betony, jenž mají nízkou propustnost proti vodě jsou extrémně náchylné na explozivní odstřelování povrchu betonu. Z obrázku č. 5 je možné vidět, že je nutná ochrana konstrukčního betonu, aby teplota nepřekračovala  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [39].



Obr. 5: Vliv požáru na beton a ocelovou výztuž [40].

Sekundární ostění tunelu (definitivní ostění) musí odolat případnému požáru v tunelu, přičemž nesmí dojít k porušení statiky (mezní stavy požární odolnosti dle ČSN EN 73 0810). Základní požadavek je, aby veškeré materiály, které se nacházejí v tunelu, splňovaly požadavky na třídu A1 dle ČSN EN 13501-1. Výjimku ovšem mají veškeré hydroizolační fólie a plastové pásy, které se používají do dilatačních spár. Toto tvrzení lze v případě vodonepropustného ostění tunelu zjednodušit, protože vodonepropustnost je zajištěna samotným betonem a není tedy třeba hydroizolačních fólií [27].

Předpokládá se, že v průběhu 6 minut od počátku požáru dochází k nárůstu teploty až na 1200 °C. Je nutné nadále počítat s tím, že tato teplota se udržuje dalších 30 minut. Poté již dochází k poklesu teploty po dobu 110 minut [34].

Při požáru vniká teplo od vnějších do vnitřních oblastí betonu. Vznikají zde vynucená napětí od požáru, která je nutno zohlednit v celkových namáháních s určitou mírou ochrany. Při požáru velmi rychle narůstají teploty a při rostoucí teplotě se vlastnosti betonu, ale zejména oceli snižují. Při velmi prudkém nárůstu teplot dojde k odloupení povrchových vrstev betonu. Rozsah odloupení betonu je závislý především na pevnosti betonu, jeho obsahu vody a na omezení volné dilatace [4], [34].



Při požáru je nutné brát v úvahu všechny konstrukční problémy:

- Explosivní odstřelování povrchu betonu – toto odstřelování trvá do doby, než dojde k úplnému rozpadu betonu nebo do doby než je uhašen požár v tunelu [39].
- Dochází k poklesu pevnosti betonu [39].
- Ocelová výztuž ztrácí svoji pevnost – především důležitá pevnost v tahu (ještě při nižší teplotě než beton) [39].
- Protože mají složky betonu různou teplotní roztažnost, dochází k trhlinám v konstrukci [39].

### 5.23 Polypropylenová vlákna

Z důvodu několika požárů v evropských tunelech, při kterých došlo k výraznému poškození staveb, se do betonu přidávají polypropylenová vlákna. Polypropylenová vlákna zvyšují požární odolnost konstrukce a také se podílejí na pasivní požární bezpečnosti tunelu. Účelem pasivní požární ochrany je chránit beton před všemi konstrukčními problémy uvedenými v kapitole požární odolnost [20]. V současné době se na trhu prosazují polypropylenová vlákna s průměrem od 18 do 32 mikrometrů. Dávkování do betonové směsi se pohybuje v intervalu 1–3 kg/m<sup>3</sup> čerstvého betonu (při požadavcích pouze na zamezení vzniku trhlin je vhodnější použít dávkování 0,6–1,5 kg/m<sup>3</sup> betonu [43]) a je odvislé od navrhovaného požáru. Polypropylenová vlákna se totiž při teplotě cca 160°C taví a umožňují únik vodní páry z betonu, aniž by došlo ke zvýšení tlaku v betonu a tím se zamezí explozivnímu odstřelování. Při navrhování záměsi s polypropylenovými vlákny je však nutné počítat s tím, že vlákna přidávaná do betonu způsobují jeho horší čerpatelnost a je tedy nutné provést technologická opatření, aby se těmto problémům předcházelo. Polypropylenová vlákna chrání před odstřelováním betonu při vysokých teplotách, ale nechrání beton ani výztuž před účinky vysokých teplot, kterým je ostění při požáru vystaveno [20].

Použití polypropylenových vláken je nejvhodnější v místech, kde je zvýšené riziko poškození dalších důležitých objektů rozšiřujícím se požárem. Univerzální použití polypropylenových vláken tj. pro celý tunel není nejvhodnější [5]. Toto tvrzení také podporují i jiné zdroje [27], jež zmiňují, že zvýšené opatření v podobě vyztužení betonu vlákny je nutné uvažovat pouze v místech s možnými katastrofálními následky. Použití polypropylenových vláken (pasivní ochrany) je třeba zdůvodnit nějakou nutnou ochranou, například máme-li železniční trať nad mělkým tunelem a požár v tunelu by nám mohl přímo ohrožovat definitivní obezdívku či způsobit deformaci horninového masivu a tímto zapříčinit nutnou výluku v jízdním řádu (přerušení provozu na trati) [5].

## **6 MOŽNOST VYUŽITÍ SAMOZHUTNITELNÉHO BETONU**

### **PRO VODONEPROPUSTNÉ OSTĚNÍ TUNELŮ**

#### **6.1 Použití a trvanlivost samozhutnitelného betonu**

Samozhutnitelný beton (Selfcompacting concrete – SCC) byl vyvinut v roce 1988. Cílem samozhutnitelného betonu bylo reagovat na problém trvanlivosti betonových konstrukcí v Japonsku. Aby byly konstrukce dostatečně trvanlivé, je nutné kvalitně provedené zhutnění betonu. Snižování kvality pracovníků vedlo také ke snížení kvality prováděných prací. Samozhutnitelný beton však dosahuje oproti obyčejnému vibrovanému betonu výborné trvanlivosti konstrukce. Je zde totiž vyloučen vliv lidského činitele. Samozhutnitelný beton se totiž působením vlastní hmotnosti rozteče a dokonale vyplní bednění bez jakékoliv nutnosti vibrace směsi. Vysokohodnotný beton je definován dle [23] jako beton, u kterého je zvýšena trvanlivost díky dostatečně snížené hodnotě vodního součinitele. Z tohoto důvodu lze samozhutnitelný beton zařadit do kategorie vysokohodnotných betonů [22].

Samozhutnitelný beton má složení podobné, jako mají běžné (vysokopevnostní) betony. Rozdíl mezi samozhutnitelným a běžným betonem je tedy ve způsobu ukládání čerstvého betonu. Z tohoto důvodu je nutné určit požadavky na zpracování, či případné ukládání v čerstvém stavu. Co se týče zatvrdlého stavu, je jeho použití obdobné jako u běžného betonu. Z tohoto důvodu je použití samozhutnitelného betonu vázáno pouze na technologii výroby stavby [12].

Samozhutnitelný beton je tedy možno použít pro vodonepropustná sekundární betonová ostění tunelů. Literatura [24] dokonce udává ostění tunelu přímo jako jednu z možných aplikací samozhutnitelného betonu. Je však nutno brát ohled na výhody či případné nedostatky při používání samozhutnitelného betonu.

#### **Výhody:**

- Dokonalé probetonování a velmi dobrá kvalita povrchu betonu.
- Omezení hlučnosti na stavbě (není potřeba vibrace).
- Urychlení betonáže (platí pro velkobjemové konstrukce jako je ostění tunelu).
- Možno betonovat i hustě vyztužené konstrukce.



**Nevýhody:**

- Betonovaný prvek musí mít horizontální vrchní plochu (z důvodu vytékání betonu z bednění).
- Zvýšené požadavky na bednění (při aplikaci SCC je vždy nutné požadovat bednění o vyšší těsnosti, protože SCC vytéká i velmi malými otvory a došlo by ke znehodnocení povrchu betonu).
- Vyšší cena oproti běžnému betonu (dříve byla cena diametrálně odlišná od ceny běžného betonu, v dnešní době je však cena jen nepatrně vyšší, řádově o 15 až 20 %).

Vhodnost použití samozhutnitelného betonu pro vodonepropustná betonová ostění však potvrzuje i zdroj [44], který udává, že klasický monolitický beton se hutní za pomoci příložených vibrátorů (omezeně ponornými vibrátory). Toto hutnění lze sice částečně kontrolovat přes okénka v bednicím voze, ale je velice nesnadné zkontrolovat, jestli je beton správně zhutněn v celé tloušťce ostění. Správné zhutnění je však velmi důležité pro kvalitu ostění, protože není-li beton správně zhutněn, může docházet k průsakům nebo tečení ostění [44].

V tomto případě je tedy velmi vhodné použít pro betonáž samozhutnitelný beton. Z výše zmíněných výhod se zde nejvíce projevuje dokonalé zhutnění v celém průřezu ostění a vyšší rychlost betonáže. Z nevýhod se naopak nejvíce projevuje zvýšený tlak na bednění, což prodražuje konstrukci formy. Částečného omezení tlaku betonu na bednění lze docílit zpomalením betonáže. V tomto případě je však nutné ověřit tlaky na bednění při různých rychlostech betonáže [44].

## **6.2 Složení samozhutnitelného betonu**

### **Kamenivo**

Pro navrhování kameniva do SCC betonu se musíme řídit podmínkami normy ČSN EN 206-1. Je také vhodné se řídit TKP kap. 18. Kamenivo je velmi důležité pro vlastnosti samozhutnitelného betonu. Nejvhodnější je používat plynulou čáru zrnitosti, protože zastoupení jednotlivých frakcí kameniva ovlivňuje viskozitu. Pro výrobu SCC je možno použít jak těžené, tak i drcené kamenivo (je však nutné, aby byl kulovitý tvar). Je doporučeno využívat frakcí kameniva do 16 mm výjimečně pak 22 mm [12].

## Cement

Používání cementu se řídí dle ČSN EN 197-1. To, jaký použijeme cement, je dáno tím, jaké očekáváme výsledné vlastnosti. Obecně však platí, že je nejvýhodnější užití například síranovzdorných cementů, které tolik neobsahují trikalciumaluminát. Jako vhodná varianta může být využití strusko-portlandského cementu. Měrný povrch dle Blaina u těchto cementů bývá nejčastěji v intervalu 350 až 400 m<sup>2</sup>/kg [14].

## Přísady

Pro správné složení betonové záměsi je nutné používat plastifikační přísady. Plastifikační přísady buďto snižují potřebné množství vody nebo při stejném vodním součiniteli zvyšují zpracovatelnost betonové směsi. Většinou se používají plastifikační přísady na bázi polykarboxylátů, ale za současného dodržení předpokladu, že při používání plastifikátoru se musí brát ohled na druh zvoleného cementu. Dnešní superplastifikační přísady umožňují při dávkování 0,5 až 3 % z  $m_c$  snížit poměr  $v/c$  i pod 0,2. Toto všechno je umožněno i za předpokladu, že dávkujeme na 1 m<sup>3</sup> čerstvého betonu 600 až 800 kg velmi jemných částí [14]. Aby se pokud možno zamezilo odlučování, je vhodné použití přísad, které upravují viskozitu betonu. Tento typ přísady upraví viskozitu při současném zachování tekutosti betonu. Čerstvý beton také pak není tolik citlivý na výkyvy vlhkosti kameniva [12]. Co se týče provzdušňovacích přísad a pigmentů, tak je jejich použití obdobné jako u běžného betonu.

## Příměsi

Příměsi jsou velmi důležité při navrhování SCC, protože zlepšují vlastnosti čerstvého samozhutnitelného betonu. Z inertních příměsí se používá jemně mletý vápenec. Z hydraulických či pucolánových se používá popílek nebo velmi jemně mletá struska. Obvyklé dávkování příměsí se pohybuje v intervalu 10 – 30 % z množství cementu [14]. Tyto příměsi (nazývané také jako příměsi II druhu) také slouží jako částečná náhrada pojiva. Současně ale také snižují hydratační teplo a smrštění. Snížení hydratačního tepla a smrštění pak vede ke zvýšení vodonepropustnosti betonového ostění. Pokud je požadavek na zvýšení kvality povrchu ztvrdlého betonu, je vhodné užití minerálního mikroplniva, přičemž většina zrn by měla být menší než je 0,063 mm [12].

## Složení SCC

Pro získání požadovaných vlastností SCC je třeba při navrhování záměsi dodržet několik principů:

- Omezit vodní součinitel a použít superplastifikační přísady (nutné pro správné protečení a vyplnění prostoru).

- Používat ve významné míře inertní a latentně hydraulické příměsi (z důvodu minimalizace vzniku trhlin a tedy zajištění vodonepropustnosti betonu).
- Kamenivo by mělo být plně obaleno cementovým tmelem, který zajišťuje správný přesun zrn kameniva [11].

Pokud tedy budeme porovnávat složení SCC s běžným betonem, bude běžný beton obsahovat více hrubého kameniva, menší množství cementu, bude mít větší vodní součinitel, v menší míře budou používány plastifikátory a přísady upravující viskozitu.

### **6.3 Vlastnosti samozhutnitelného betonu**

#### **Pevnost v tlaku**

Pokud porovnáme SCC s běžným betonem při zachování stejného poměru  $v/c$ , bude mít SCC vždy větší pevnost. Je to z toho důvodu, že odpadá vibrování betonové směsi a tím dojde ke zvýšení spolupůsobení mezi plnivem a pojivem. Tvar křivky náběhu pevností přitom zůstává zachován [11].

#### **Pevnost v tahu**

SCC je možno vyrobit s libovolnou pevností. Pevnost v tahu je pro zvolenou pevnostní třídu shodná s běžným vibrovaným betonem. Je to z toho důvodu, že objemy cementu, jemných podílů a vody neovlivňují tuto pevnost [11].

#### **Modul pružnosti**

Modul pružnosti vyjadřuje poměr mezi napětím a přetvořením u ztvrdlého betonu. Čím vyšší máme modul pružnosti, tím větší zatížení musíme vyvinout, aby vznikla shodná deformace. Modul pružnosti závisí především na kvalitě kameniva. Při použití kameniva s vysokým modulem pružnosti dojde ke zvýšení modulu pružnosti i výsledného betonu. Pokud potřebujeme zvýšit modul pružnosti, je tedy vhodné použít jako kameniva hrubé frakce amfibolit a čedič, ale jelikož se jedná o drcená kameniva, tak nejsou příliš vhodná pro samozhutnitelné betony. Při zkoušce L-boxem se toto projeví v blokaci zrn kameniva u výztuže. Jelikož se také jedná o těžší kameniva, tak způsobují segregaci, ale tu lze ovlivnit tím, že snížíme vodní součinitel a přidáme plastifikační přísadu. Objem cementového tmele ale naopak modul pružnosti ztvrdlého betonu snižuje. Při porovnávání betonu na sekundární ostění tedy docházíme k tomu, že při použití SCC dostaneme oproti běžnému vibrovanému betonu beton s nižším modulem pružnosti. Oproti běžným vibrovaným betonům je modul pružnosti nižší až o 20 %. Je to z toho důvodu, že SCC obsahuje větší podíl cementového tmele. Modul pružnosti se používá především pro vypočítání průhybů [13].

## **6.4 Zkoušky na testování samozhutnitelných betonů**

Pokud je třeba vyzkoušet konzistenci čerstvého samozhutnitelného betonu, je třeba využít jiných zkoušek než u tradičního vibrovaného betonu, protože na rozdíl od běžného vibrovaného betonu má SCC vyšší konzistenci. Při zkouškách konzistence je možné využít šesti zkoušek na testování SCC a to rozlití a času  $T_{500}$ , V-Funnel test, L-box, Orimet, J-ring a zkoušky segregace. Pro praktické využití je však nejlepší pouze kombinace zkoušek L-box a zkouška rozlitím a čas  $T_{500}$ . Jako první kontrola konzistence čerstvého SCC by se měla provádět zkouška rozlitím a čas  $T_{500}$ .

## **6.5 Zkouška rozlitím kužele a čas $T_{500}$**

Tato zkouška udává schopnost tečení čerstvého samozhutnitelného betonu bez překážek. Jedná se o zkoušku dle ČSN EN 12350-8 Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlitím. Tato zkouška je obdobou zkoušky na tradičním vibrovaném betonu ČSN EN 12350-2 (zkouška sednutím kužele). Čas  $T_{500}$  nám udává rychlost tečení čerstvého samozhutnitelného betonu [11].

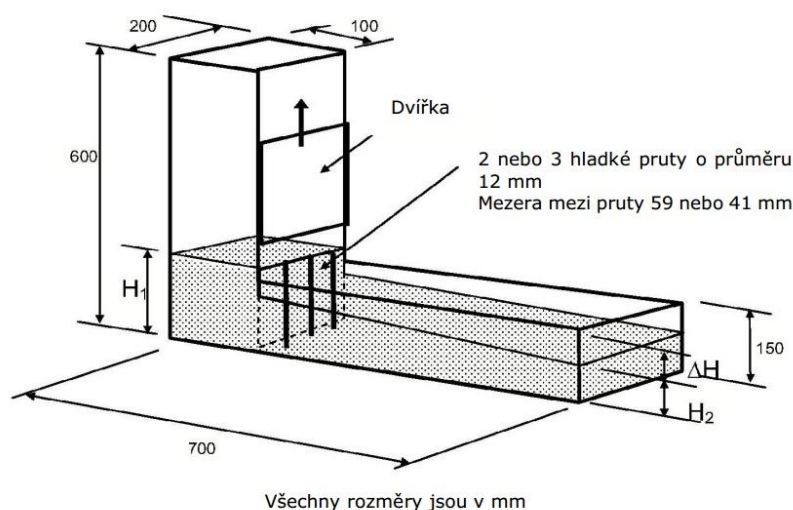
Princip spočívá v tom, že vlijeme čerstvý beton do Abramsova kuželu (ten samý kužel, jenž se využívá při zkoušce ČSN EN 12350-2). Kužel zvedneme a necháme beton, aby se samovolně roztékal. Doba, jenž uplyne mezi zvednutím kužele a chvíle, kdy se SCC rozteče do průměru 500 mm se nazývá  $T_{500}$ . Po ukončení rozlévání samozhutnitelného betonu je měřen průměr rozlití ve dvou na sebe kolmých směrech. Následným aritmetickým průměrem z těchto dvou hodnot získáme hodnotu rozlití kužele [11].

## **6.6 Zkouška L-boxem**

Tato zkouška se využívá, chceme-li posoudit schopnost betonu protékat mezi otvory, jako jsou například mezery mezi výztuží. Toto vše se zkouší, aniž by došlo k odlučování kameniva nebo případnému vzpříčení kameniva v nejužším místě. Pro tuto zkoušku jsou přípustné dvě varianty. Jedna varianta zahrnuje použití dvou prutů výztuže. Při druhé variantě se využívají tři pruty výztuže, což má simulovat husté vyztužení [11].

Princip zkoušky spočívá v tom, že máme předem připravený předepsaný objem betonu, jenž má protéci mezi svisle umístěnou výztuží bez žebírek a při zkoušce se zjišťuje výška hladiny betonu, jenž nám protekl mezi touto svisle umístěnou výztuží (odolnost proti blokaci) [11].

Rozměry L-boxu udává obrázek č. 6.



Obr. 6: Rozměry L-boxu [16].

## 6.7 Informace získané ze zkoušek konzistence čerstvého SCC

Zkouška rozlitím kužele a čas  $T_{500}$  nám udává schopnost tečení čerstvého betonu. Pokud se čas  $T_{500}$  pohybuje v intervalu 3–5 s, je vše v pořádku. Pokud se ale čas  $T_{500}$  blíží 5 s, je nutné počítat s tím, že beton už má omezené schopnosti tečení a tedy není úplně vhodný jako materiál pro ostění tunelů. Dle výsledného rozlití samozhutnitelného betonu zatřídíme beton do třídy SF1–SF3. Z této klasifikace je nejzajímavější třída SF1 (550–650 mm), jelikož je vhodná pro nevyztužené nebo slabě vyztužené betonové konstrukce, kde se beton ukládá shora, pro úseky malých rozměrů, u nichž není bráněno roztékání samozhutnitelného betonu a především pro ukládání čerpáním pomocí injektážního systému (např. ostění tunelů). Tato třída je sice velmi vhodná pro použití na ostění tunelů, ale je lepší se držet spíše horní hranice této třídy tedy 650 mm rozlití, protože pokud bude výsledné rozlití betonu menší než 640 mm, tak bude beton hůře vyplňovat bednění. Zkouška rozlitím nám také udává další informace ohledně odolnosti vůči rozměšování čerstvého betonu a také informace ohledně stejnoměrnosti betonové směsi. Pokud totiž při této zkoušce nalezneme po obvodu rozlitého samozhutnitelného betonu prstenec vody, pak je beton náchylný na bleeding a tedy nebude mít kvalitní povrch (z hlediska hodnocení kvality povrchu výsledného ostění). Bleedingu však není třeba se obávat, neboť na bleeding a také segregaci jsou náchylné především betony, jenž mají rozlití nad 700 mm. Pokud však k bleedingu dochází, lze si pomoci tím, že snížíme vodní součinitel [11].

## **7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **7.1 Cíle experimentu práce**

Cílem práce bylo posoudit vliv použitých příměsí (popílek, vápenec, struska) na vlastnosti vodonepropustnosti betonu, od kterého se očekává, že bude sloužit pro výrobu vodonepropustného betonového ostění tunelů. Nejvyšší požadavky byly tedy kladeny na zvýšení vodonepropustnosti betonu. Sledována byla také pevnost, objemová hmotnost v čerstvém i ztvrdlém stavu, konzistence, obsah vzduchu a odolnost proti CHRL. Složení betonu bylo navrženo tak, aby první záměs odpovídala betonu, jež se běžně využívá na realizaci tunelových ostění. Z tohoto důvodu první záměs obsahovala kamenivo frakce 11–22 mm. Poté byl proveden návrh složení betonu bez této frakce a bez příměsí, aby bylo možné porovnat beton bez příměsí a betony s 20% přídavkem příměsí. Jako příměs byly použity struska, popílek a vápenec. Experiment se tedy snaží prokázat pozitivní vliv těchto příměsí na vodonepropustnost betonu za současného očekávaného poklesu pevnosti betonu. Očekává se, že rozdíl v pevnostech mezi referenčním betonem II a betony s příměsemi se bude s časem snižovat. Je to z toho důvodu, že betony s příměsemi budou obsahovat později vzniklé C-S-H gely, které budou zvyšovat tuto pevnost v delším časovém horizontu.

### **7.2 Složení betonu**

Na výrobu zkušebních těles byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R (Českomoravský cement, a. s. Mokrý), poté kamenivo frakce 0–4 mm (Žabčice), 4–8 mm (Náklo), 8–16 mm (Olbramovice) a 11–22 mm (Dobříň). Pro částečnou náhradu cementu byly použity různé druhy příměsí, a to elektrárenský popílek z Dětmovic, jemně mletý vápenec z Mokré a struska z Dětmovic. Jako plastifikační přísada byla použita Sika Viscocrete 1035 a jako provzdušňovací přísada byla použita Sika LPS A-94. Složení jednotlivých záměsů je patrné z tabulky č. 1.

Tab. č. 1 – Složení betonů.

označení receptury	Ref I [kg / m <sup>3</sup> ]	Ref II [kg / m <sup>3</sup> ]	Pop 20 [kg / m <sup>3</sup> ]	Vap 20 [kg / m <sup>3</sup> ]	Str 20 [kg / m <sup>3</sup> ]
CEM I 42,5R, Mokrá	385	385	308	308	308
DTK 0–4 mm, Žabčice	790	820	820	820	820
HTK 4–8 mm, Náklo	-	230	230	230	230
HDK 8–16 mm, Olbramovice	670	695	695	695	695
HDK 11–22 mm, Dobříň	310	-	-	-	-
Sika Viscocrete 1035	1,92	1,92	1,54	1,54	1,54
Sika LPS A-94	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
voda	165	165	165	165	165
popílek Dětmárovice	-	-	77	-	-
jemně mletý vápenec Mokrá	-	-	-	77	-
struska Dětmárovice	-	-	-	-	77

Poznámka: Ref I-referenční beton I, Ref II-referenční beton II, Pop 20-20 % cementu nahrazeno popílkem, Vap 20-20 % cementu nahrazeno vápencem, Str 20-20% cementu nahrazeno struskou

### 7.3 Metodika práce

1. Nejdříve bylo provedeno vysušení vstupních surovin z důvodu případných nežádoucích změn v receptuře. Následovalo navažování jednotlivých surovin pro přípravu záměsi a jejich dávkování do míchačky. Navažování bylo provedeno na objem 0,047 m<sup>3</sup> pro zaplnění osmi forem o rozměru 150 × 150 × 150 mm a čtyř forem o rozměru 200 × 200 × 120 mm.
2. Po promíchání betonu byly na čerstvém betonu provedeny zkoušky sednutím kužele dle ČSN EN 12 350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím, rozlitím dle ČSN EN 12 350-5 Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím a zkouška obsahu vzduchu – tlaková metoda dle ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody
3. Dále bylo provedeno stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu dle ČSN EN 12 350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost v čerstvém stavu
4. Výroba zkušebních těles pro požadované zkoušky na ztvrdlém betonu
5. Na vzorcích byly po 7 a 28 dnech provedeny zkoušky stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu dle ČSN EN 12 390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7:

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu a pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12 390-3  
Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

6. Aby byla prokázána schopnost betonu odolávat tlakové vodě bez použití hydroizolace, byly provedeny zkoušky ČSN EN 12 390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou a ÖNORM B3303 Betonprüfung (tlaky 0,7 a 1,2 MPa)
7. Jako poslední byla provedena zkouška odolnosti proti CHRL dle 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

## 7.4 Výsledky zkoušek

V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny výsledky navržených a zkoušených betonů. Zkoušky byly prováděny vždy na dvou zkušebních tělesech, přičemž jako výsledná hodnota byla použita hodnota z aritmetického průměru. V tabulkách je označena objemová hmotnost v čerstvém stavu jako  $D_c$ , objemová hmotnost v ztvrdlém stavu po 7 dnech jako  $D_7$  a po 28 dnech jako  $D_{28}$ . Pevnost v tlaku po 7 dnech byla označena jako  $f_{c7}$  a po 28 dnech jako  $f_{c28}$ . Co se týče vodotěsnosti betonu, označení V 0,5 – testováno dle ČSN EN 12 390-8 při tlaku 0,5 MPa; V 0,7 a V 1,2 – Zvýšená vodotěsnost dle ÖNORM B3303 Betonprüfung při použitím tlaku 0,7 MPa a 1,2 MPa.

### 7.4.1 Referenční beton I – Ref I

#### Čerstvý beton

Tab. č. 2 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Ref I)

VLASTNOSTI ČB – Ref I	sednutí [mm]	rozlití [mm]	vzduch [%]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
	160	450	7,0	2320

#### Ztvrdlý beton

Tab. č. 3 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Ref I)

VLASTNOSTI ČB – Ref I	$D_7$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{c7}$ [MPa]	$D_{28}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{c28}$ [MPa]
	2280	39,3	2270	41,1



### Vodotěsnost betonu

Tab. č. 4 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Ref I)

VODOTĚSNOST ZB – Ref I	V 0,5 [mm]	V 0,7 [mm]	V 1,2 [mm]
	9	20	34

### Odolnost proti CHRL

Tab. č. 5 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Ref I)

ODOLNOST PROTI CHRL	odpad po cyklech [g/m <sup>2</sup> ]		zatřídění
	50 cyklů	100 cyklů	
	32,4	74,2	slabě narušený povrch

## 7.4.2 Referenční beton II – Ref II

### Čerstvý beton

Tab. č. 6 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Ref II)

VLASTNOSTI ČB – Ref II	sednutí [mm]	rozlití [mm]	vzduch [%]	D <sub>č</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
	200	460	6,5	2280

### Ztvrdlý beton

Tab. č. 7 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Ref II)

VLASTNOSTI ČB – Ref II	D <sub>7</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c7</sub> [MPa]	D <sub>28</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c28</sub> [MPa]
	2270	36,5	2260	37,8

### Vodotěsnost betonu

Tab. č. 8 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Ref II)

VODOTĚSNOST ZB – Ref II	V 0,5 [mm]	V 0,7 [mm]	V 1,2 [mm]
	11	24	34

### Odolnost proti CHRL

Tab. č. 9 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Ref II)

ODOLNOST PROTI CHRL	odpad po cyklech [g/m <sup>2</sup> ]		zatřídění
	50 cyklů	100 cyklů	
	43,8	103,7	slabě narušený povrch

### 7.4.3 20% náhrada cementu popílkem – Pop 20

#### Čerstvý beton

Tab. č. 10 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Pop 20)

VLASTNOSTI ČB – Pop 20	sednutí [mm]	rozlití [mm]	vzduch [%]	D <sub>č</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
	150	450	6,0	2270

#### Ztvrdlý beton

Tab. č. 11 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Pop 20)

VLASTNOSTI ČB – Pop 20	D <sub>7</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c7</sub> [MPa]	D <sub>28</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c28</sub> [MPa]
	2260	35,2	2260	36,6

#### Vodotěsnost betonu

Tab. č. 12 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Pop 20)

VODOTĚSNOST ZB – Pop 20	V 0,5 [mm]	V 0,7 [mm]	V 1,2 [mm]
	5	9	16

#### Odolnost proti CHRL

Tab. č. 13 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Pop 20)

ODOLNOST PROTI CHRL	odpad po cyklech [g/m <sup>2</sup> ]		zatřídění
	50 cyklů	100 cyklů	
	120,5	250,6	slabě narušený povrch

### 7.4.4 20% náhrada cementu vápencem – Vap 20

#### Čerstvý beton

Tab. č. 14 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Vap 20)

VLASTNOSTI ČB – Vap 20	sednutí [mm]	rozlití [mm]	vzduch [%]	D <sub>č</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
	160	440	6,5	2260

#### Ztvrdlý beton

Tab. č. 15 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Vap 20)

VLASTNOSTI ČB – Vap 20	D <sub>7</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c7</sub> [MPa]	D <sub>28</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c28</sub> [MPa]
	2240	27,2	2240	32,0

### Vodotěsnost betonu

Tab. č. 16 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Vap 20)

VODOTĚSNOST ZB – Vap 20	V 0,5 [mm]	V 0,7 [mm]	V 1,2 [mm]
	6	10	19

### Odolnost proti CHRL

Tab. č. 17 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Vap 20)

ODOLNOST PROTI CHRL	odpad po cyklech [g/m <sup>2</sup> ]		zatřídění
	50 cyklů	100 cyklů	
	51,2	103,5	slabě narušený povrch

## 7.4.5 20% náhrada cementu struskou – Str 20

### Čerstvý beton

Tab. č. 18 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Str 20)

VLASTNOSTI ČB – Str 20	sednutí [mm]	rozlití [mm]	vzduch [%]	D <sub>c</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
	170	450	7,0	2250

### Ztvrdlý beton

Tab. č. 19 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Str 20)

VLASTNOSTI ČB – Str 20	D <sub>7</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c7</sub> [MPa]	D <sub>28</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	f <sub>c28</sub> [MPa]
	2240	29,9	2230	32,2

### Vodotěsnost betonu

Tab. č. 20 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Str 20)

VODOTĚSNOST ZB – Str 20	V 0,5 [mm]	V 0,7 [mm]	V 1,2 [mm]
	6	8	13

### Odolnost proti CHRL

Tab. č. 21 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Str 20)

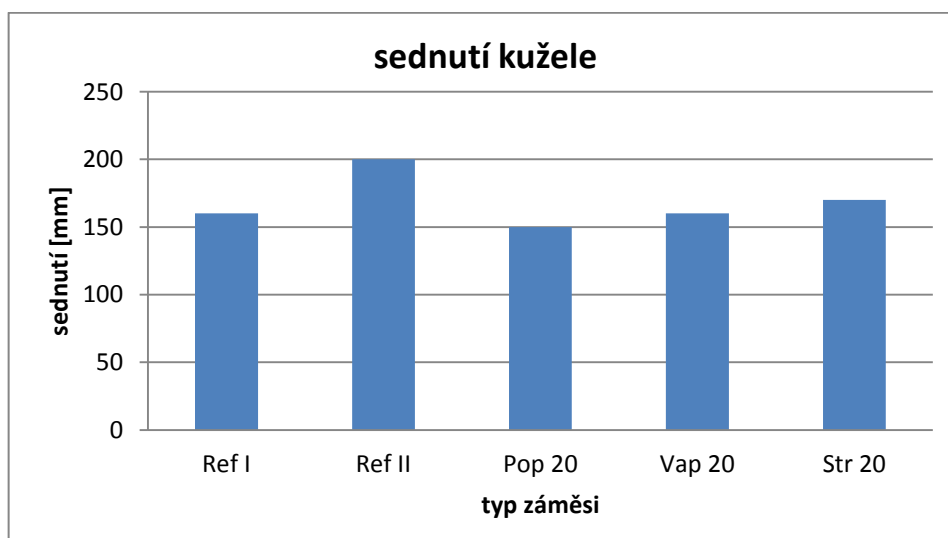
ODOLNOST PROTI CHRL	odpad po cyklech [g/m <sup>2</sup> ]		zatřídění
	50 cyklů	100 cyklů	
	52,9	169,3	slabě narušený povrch

## 7.5 Shrnutí výsledků zkoušek

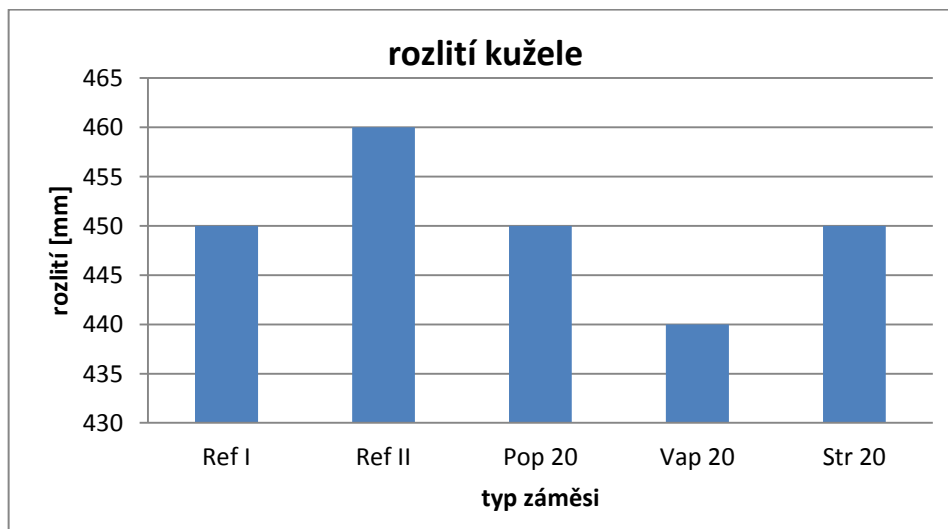
### Čerstvý beton:

Tab. č. 22 – naměřené hodnoty a vyhodnocená měření na čerstvém betonu.

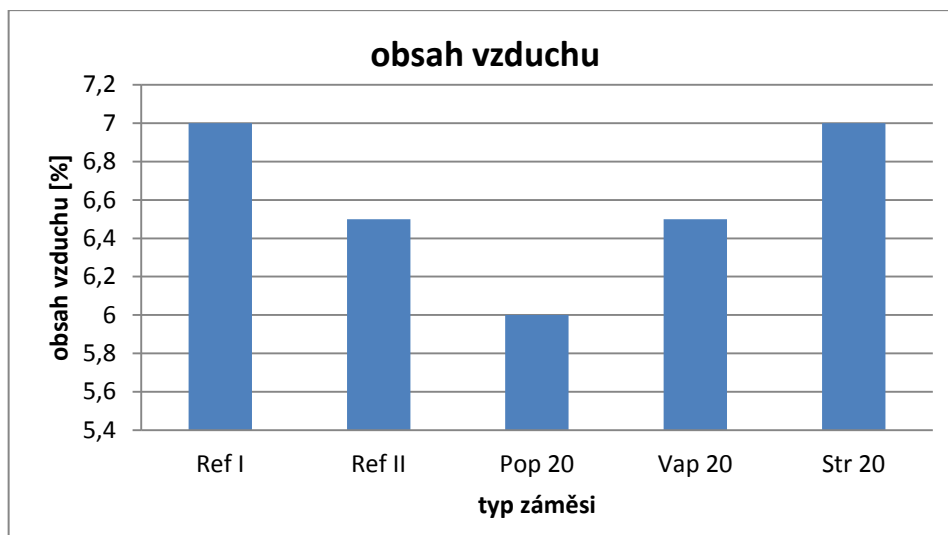
zkouška Receptura	sednutí [mm]	rozlití [mm]	obsah vzduchu [%]	$D_{\xi}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Ref I	160	450	7,0	2320
Ref II	200	460	6,5	2280
Pop 20	150	450	6,0	2270
Vap 20	160	440	6,5	2260
Str 20	170	450	7,0	2250



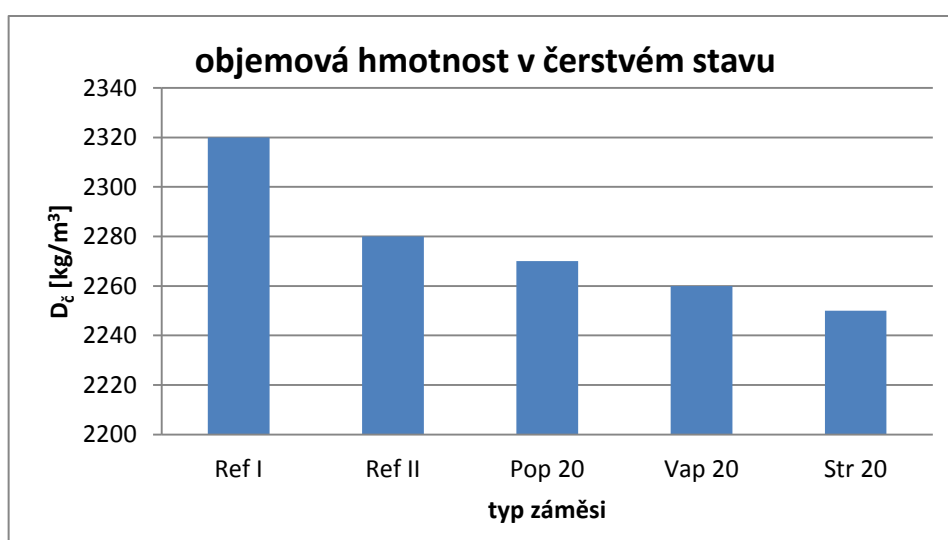
Obr. 7: Grafické znázornění sednutí kužele u jednotlivých záměsí



Obr. 8: Grafické znázornění rozlití u jednotlivých záměsí



Obr. 9: Grafické znázornění obsahu vzduchu u jednotlivých záměsí



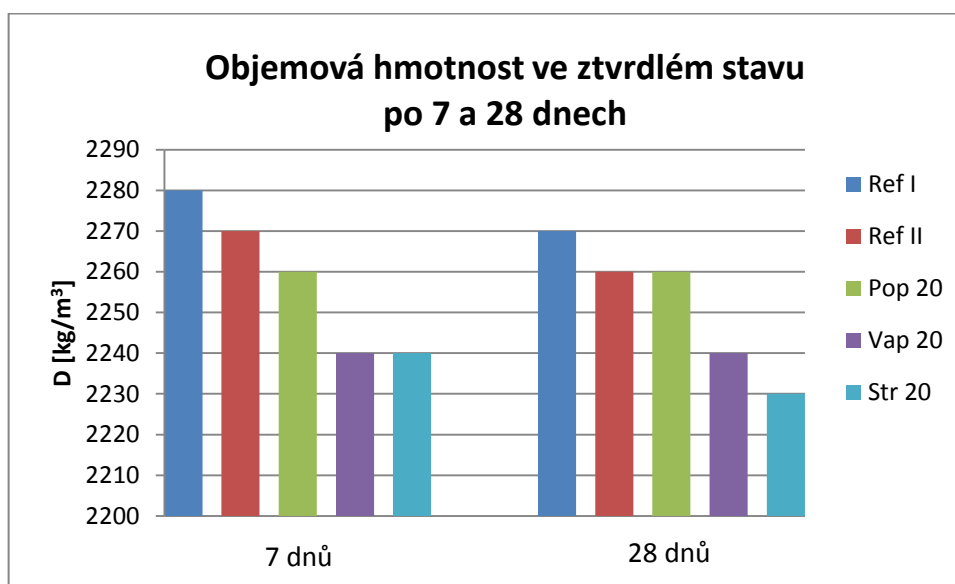
Obr. 10: Grafické znázornění objemových hmotností u jednotlivých záměsí

Sednutí kužele se dle předpokladu pohybovalo v kategorii S4. Odchylka od této konzistence nastala pouze u záměsi s popínkem, protože tato záměs byla tixotropní. Tato odchylka se nevyskytuje u vyhodnocení rozlití z toho důvodu, že nejdříve byla provedena právě zkouška rozlitím a tixotropie se projevila zhruba po třech minutách od zamíchání. Rozlití kužele se pohybovalo ve stanovených mezích, tzn. ve stupni rozlití betonu F3. Obsah vzduchu se pohyboval mezi 6–7 %. Nedocházelo tedy k žádným extrémním výkyvům. Největší objemovou hmotnost v čerstvém stavu měl beton s frakcí 11–22 mm. Poté beton bez příměsí a s plynulou křivkou zrnitosti. Poté následovaly betony s příměsemi – největší objemovou hmotnost měl beton s popínkem, poté s vápencem a nakonec se struskou.

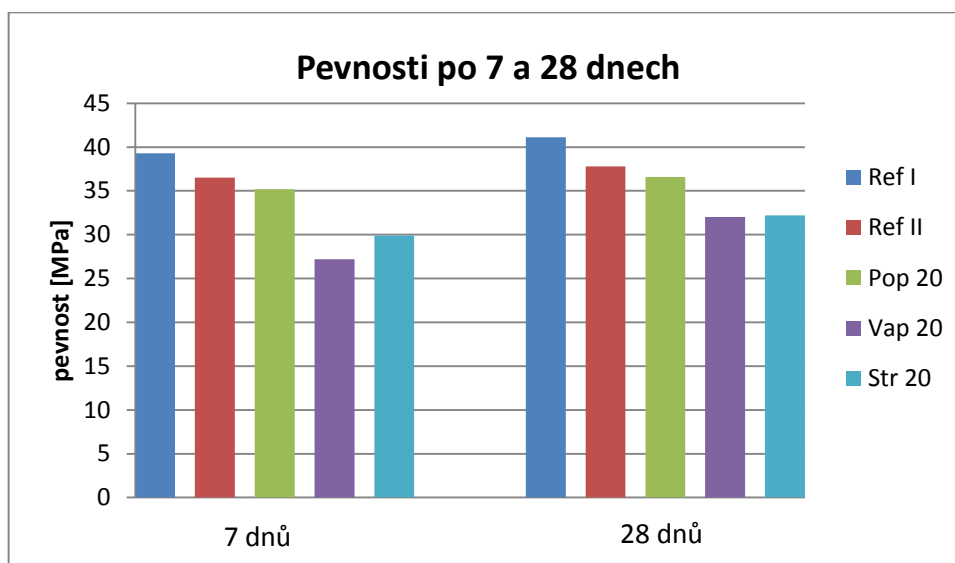
## Ztvrdlý beton:

Tab. č. 23 –vyhodnocená měření na ztvrdlém betonu.

zkouška Receptura	D <sub>7</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Fc <sub>07</sub> [MPa]	D <sub>28</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Fc <sub>028</sub> [MPa]
Ref I	2280	39,3	2270	41,1
Ref II	2270	36,5	2260	37,8
Pop 20	2260	35,2	2260	36,6
Vap 20	2240	27,2	2240	32,0
Str 20	2240	29,9	2230	32,2



Obr. 11: Grafické znázornění objemových hmotností po 7 a 28 dnech



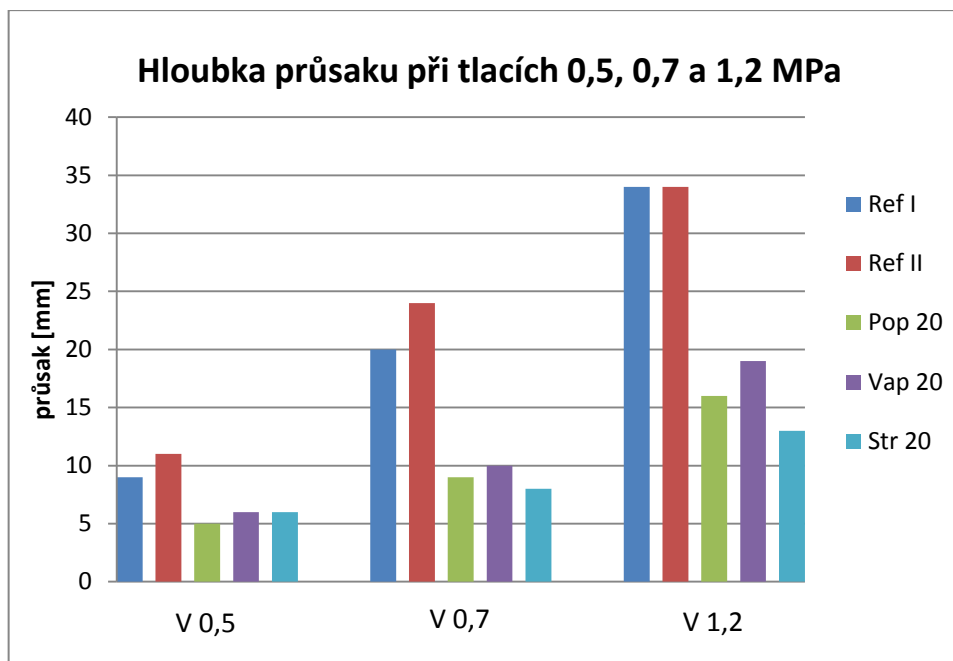
Obr. 12: Grafické znázornění pevností po 7 a 28 dnech

Stejně jako v případě objemové hmotnosti v čerstvém stavu, měly vzorky ve ztvrdlém stavu objemovou hmotnost po 7 dnech největší u betonu s frakcí kameniva 11–22 mm, poté u referenčního betonu II a následovaly betony s příměsemi (popílek, vápenec a struska). Při vyhodnocení objemových hmotností v ztvrdlém stavu po 28 dnech lze usoudit, že referenční betony mají objemovou hmotnost vyšší, než betony s příměsemi (vápencem a struskou). Dle očekávání byly největší pevnosti u referenčních betonů. Zajímavé však je, že následovala pevnost betonu s popílkem, byť očekávání bylo takové, že pevnosti u betonu s příměsemi budou největší u strusky, pak u popílku a nakonec u vápence. Ve skutečnosti ale byly pevnosti největší u popílku, následně u strusky a nakonec u vápence. Tento fakt lze však vysvětlit tím, že v případě popílku byla naměřena nejnižší hodnota obsahu vzduchu. Stejně jako u pevností po 7 dnech byly pevnosti nejvyšší u obou referenčních betonů a následovala pevnost betonu s popílkem. Pokud porovnáme pevnosti po 7 a 28 dnech, lze poznamenat, že beton s vápencem se svojí pevností přiblížil strusce. Je to z toho důvodu, že struska má rychlejší nárůst pevností a vápenec tyto pevnosti dohání až v delším časovém horizontu. Skutečnost, že beton se struskou má menší pevnost než beton s popílkem je způsobena tím samým problémem jako u 7denních pevností.

#### Hloubka průsaku tlakovou vodou

Tab. č. 24 – hloubka průsaku tlakovou vodou.

zkouška Receptura	V 0,5 [mm]	V 0,7 [mm]	V 1,2 [mm]
Ref I	9	20	34
Ref II	11	24	34
Pop 20	5	9	16
Vap 20	6	10	19
Str 20	6	8	13



*Obr. 13: hloubka průsaku tlakovou vodou*

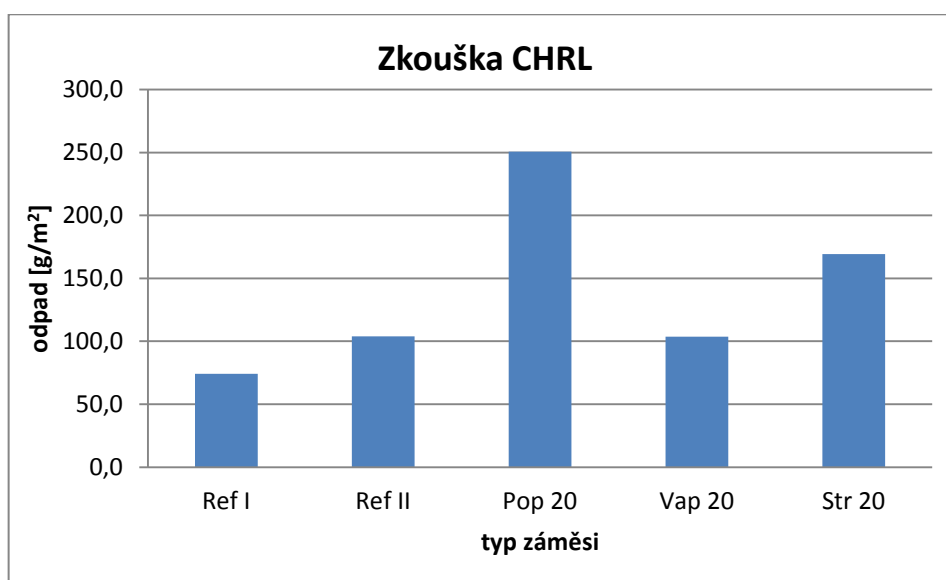
Při této zkoušce se potvrdilo očekávání, že betony, které mají část cementu nahrazenou popílkem, vápencem, či struskou dosahují lepších hodnot průsaku při zkoušce ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Tyto průsaky byly tak malé, že jsme zároveň potvrdili hypotézu, že tato zkouška není nejvhodnější pro testování vodonepropustnosti betonového ostění tunelu. Zkouška ÖNORM B3303 Betonprüfung již lépe ukazuje schopnost betonu odolávat proti značnému tlaku vody. Byl použit tlak 0,7 MPa, jenž je vhodný pro běžně stavěné tunely. Při této zkoušce vyhověly všechny typy betonů, ale betony s příměsemi vyhověly s velkou rezervou oproti betonům referenčním. Tlak 1,2 MPa byl použit z toho důvodu, aby se zjistilo, jak se navržené záměsi chovají při extrémně vysokém tlaku vody, na který se ale běžně ostění navrhovat nebudou. Při této zkoušce bylo zjištěno, že oba referenční betony při tomto tlaku nevyhověly.



**Zkouška CHRL dle 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek**

*Tab. č. 25 – Odolnost proti CHRL po 100 cyklech.*

<b>Receptura</b> \ <b>zkouška</b>	<b>CHRL [g/m<sup>2</sup>]</b>
Ref I	74,2
Ref II	103,7
Pop 20	250,6
Vap 20	103,5
Str 20	169,3



*Obr. 14: Odpad při zkoušce CHRL*

Při zkoušce CHRL jsem zaznamenal u zkušebních těles pouze velmi malé odpady a z toho důvodu lze usuzovat na vysokou trvanlivost sledovaných betonů.

## 8 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Bylo zjištěno, že konzistence betonu se příliš neměnila. Očekávání bylo takové, že konzistence u referenčních betonů bude měkčí než u ostatních, což je na obr. č. 7 a 8 vidět, ale rozdíly nejsou nikterak výrazné. Obsah vzduchu se pohyboval ve stanovených mezích. Nejmenší byl však u betonu s popínkem a je tedy možné, že kombinace popínku s provzdušňovací přísadou může způsobovat mírné výkyvy v obsahu vzduchu a v pevnostech. Objemové hmotnosti po 7 dnech byly nejvyšší u referenčních betonů, následovány objemovými hmotnosti betonů s příměsemi. Pevnosti byly dle očekávání nejvyšší u referenčních betonů. Oproti očekávání však bylo to, že pevnost betonu s popínkem byla vyšší, než u betonu se struskou. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že beton s popínkem měl menší obsah vzduchu než beton se struskou. Stejný problém se vyskytnul u 28denních pevností, kde beton se struskou dosahoval taktéž nižší pevnosti než beton s popínkem. Při 28denních pevnostech je navíc zřetelný větší nárůst pevnosti u betonu s vápencem než u betonu se struskou z toho důvodu, že došlo k později vzniklým C-S-H gelům. Prokázal jsem, že zkouška Hloubka průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12 390-8 je pro hodnocení vodonepropustnosti tunelového ostění nedostatečná. Při zvýšených tlacích vodního sloupce konkrétně při tlaku 0,7 MPa jsem zjistil, že referenční betony sice vyhoví, ale nemají žádnou rezervu. Dle očekávání dosahovaly betony s příměsemi podstatně menších hodnot průsaků než referenční betony. Při tlaku vodního sloupce 1,2 MPa již referenční betony dle očekávání nevyhověly, zatímco betony s příměsemi stále vyhověly se značnou rezervou. Při zkoušce CHRL byly pouze velmi malé odpady a z tohoto důvodu lze usoudit na vysokou trvanlivost všech betonů.

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývala shrnutím dosavadních poznatků o vodonepropustných betonových ostění tunelů. I přes předsudky (z hlediska kvality) proti stříkanému betonu jej lze použít jako stříkané jednoplášťové ostění tunelu. Daleko častější však s výhledem do budoucna určitě bude částečné započtení stříkaného primárního ostění do ostění sekundárního. Na toto primární ostění a sekundární ostění jsou však kladeny především zvýšené nároky na pevnosti betonu, stupeň vyztužení konstrukce, vývin hydratačního tepla a požadavky na teplotu při ukládání. I přes tyto hlavní nedostatky však stále převládají pozitivní přínosy vodonepropustného betonového ostění v podobě minimalizace nutných pracovních postupů, větší trvanlivosti betonu i celé konstrukce (hydroizolační fólie je totiž nejslabším článkem). Hlavní výhodou vodonepropustného ostění je však velmi snadná lokalizace a náprava vzniklých netěsností a z toho důvodu se domnívám, že do budoucna bude většina tunelů realizovaných v České republice zhotovována právě z vodonepropustného betonu. Jak již bylo výše zmíněno, na takovýto beton jsou kladeny zvýšené požadavky, ale díky nim je možné očekávat delší trvanlivost ostění a jejich bezproblémový provoz. Ještě vyšší kvalitu ostění lze dosáhnout použitím samozhutnitelného betonu. Použitím tohoto speciálního betonu navíc docílíme rychlejší betonáže a odstraníme problémy, které vznikají při nedostatečném zhutnění tradičního vibrovaného betonu. Je však nutné počítat se zvýšenými náklady na materiál a nižší hodnotou modulu pružnosti. I přes tyto nedostatky však samozhutnitelný beton najde svoje využití především u hustě vyztužených vodonepropustných ostění z toho důvodu, že u vodonepropustných ostění je požadován vyšší stupeň vyztužení.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] MELBYE, Tom. *Stříkaný beton*. MBT International Underground Construction Group, 2001. ISBN nepřiráženo.
- [2] ŠOUREK, Pavel a Matouš HILAR. *Beton v podzemním stavitelství – současný stav a vývoj*. Kolokvium Světový beton. [Online] [Citace: 27. leden 2014.] <http://www.3-g.cz/uploaded/publikace/2007---beton.pdf>.
- [3] COUFAL, Robert. *Betony pro vodonepropustné a masivní konstrukce*. TGB Metrostav [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: [http://www.tbh-metrostav.cz/fileadmin/user\\_upload/napsali\\_o\\_nas/clanky\\_ke\\_stazeni/2013\\_MPS\\_08\\_2013.pdf](http://www.tbh-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/2013_MPS_08_2013.pdf).
- [4] *Bílé vany: vodotěsné betonové konstrukce : technická pravidla ČBS 02. 2., upravené vyd.* Praha: ČBS Servis, 2007. ISBN 978-80-87158-03-6.
- [5] SRB, Martin a Matouš HILAR. Definitivní ostění konvenčně ražených tunelů v České republice – současnost a budoucnost. *Beton TKS*. 2006, ročník 6., č. 6. ISSN 1213-3116.
- [6] COUFAL, Robert. PERMACRETE® – beton vyvinutý speciálně pro bílé vany. *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media, 2013, č. 9.
- [7] *Technické kvalitativní podmínky staveb českých drah : Kapitola 20 – Tunely*. 3. vyd. Praha: České dráhy, s. o. – Divize dopravní cesty, o. z., 2001. Dostupné z: [http://typdok.tudc.cz/Files/TKP/TKP3\\_20\\_2.pdf](http://typdok.tudc.cz/Files/TKP/TKP3_20_2.pdf)
- [8] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1969.
- [9] ČSN 73 1326. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1985.
- [10] ČSN EN 12504-2 (731303). *A Zkoušení betonu v konstrukcích. Část 2, Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [11] *Evropská směrnice pro samozhutnitelný beton: Specifikace, výroba a použití*. In: Evropská směrnice pro SCC. 2005. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/9EDCE49B-E99E-4B96-9500-9C5A04AF831F/0/smernicescc.pdf>
- [12] Ministerstvo dopravy České republiky, Odbor infrastruktury. *Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací* [online]. 2007 [cit. 2014-01-27]. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%20187.pdf>

- [13] *Modul pružnosti*. In: eBeton [online]. [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>
- [14] LUKÁŠ, Josef, Jiří BRANDŠTETR, Jindřich MELCHER, Josef KRÁTKÝ, Marcela KARMAZÍNOVÁ, Tomáš VYMAZAL a Vlastimil BÍLEK. Složení a vlastnosti některých typů vysokohodnotných a samozhutňujících betonů. *Beton TKS*. 2003, 3. ročník, č. 6, s. 10. ISSN 1213-3116.
- [15] Odolnost betonu proti průsakům vody [obrázek]. In: *Technické kvalitativní podmínky staveb českých drah : Kapitola 20 – Tunely*. 3. vyd. Praha: České dráhy, s. o. – Divize dopravní cesty, o. z., 2001. Dostupné z: [http://typdok.tudc.cz/Files/TKP/TKP3\\_20\\_2.pdf](http://typdok.tudc.cz/Files/TKP/TKP3_20_2.pdf)
- [16] Rozměry L-boxu [obrázek]. In: *Evropská směrnice pro samozhutnitelný beton: Specifikace, výroba a použití*. In: Evropská směrnice pro SCC. 2005. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/9EDCE49B-E99E-4B96-9500-9C5A04AF831F/0/smernicescc.pdf>
- [17] Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB). Betonauskleidungen für Tunnel in geschlossener Bauweise. *Tunnel*. Roč. 2001, č. 3, s. 27–43. Dostupné z: <http://www.daub-ita.de/uploads/media/gtcrec08g.pdf>
- [18] ŠOUREK, Pavel, Lukáš GRUNWALD, Vladimír PETRŽELKA, Pavel KASAL, Jan KVAŠ, Miroslav PADEVĚT a Michael REMEŠ. Betonové konstrukce na tunelovém komplexu Blanka. *Beton TKS*. 2012, 12. ročník, č. 6, s. 6. ISSN 1213-3116.
- [19] HRDINA, Ivan. Podzemní stavby v České republice v posledním desetiletí. *Beton TKS*. 2006, 6. ročník, č. 6, s. 5. ISSN 1213-3116.
- [20] ZÁMEČNÍK, Michal a Frank CLEMENT. Požární ochrana konstrukce ostění tunelu. *Beton TKS*. 2006, 6. ročník, č. 6, s. 40. ISSN 1213-3116.
- [21] BILČÍK, Juraj. Mosty a tunely bez hydroizolácie? *Beton TKS*. 2006, 6. ročník, č. 6, s. 56. ISSN 1213-3116.
- [22] OKAMURA, Hajime a Masahiro OUCHI. Samozhutnitelný beton (1. část). *Beton TKS*. 2006, 6. ročník, č. 5, s. 28. ISSN 1213-3116.
- [23] AÏTCIN, Pierre-Claude. *High-Performance Concrete*. 1. vyd. London: E & FN Spon, 1998. ISBN 04-191-9270-0.
- [24] OKAMURA, Hajime a Masahiro OUCHI. Samozhutnitelný beton (2. část). *Beton TKS*. 2006, 6. ročník, č. 6, s. 60. ISSN 1213-3116.
- [25] MYŠKA, Milan. Popílek do betonu vyhovující ČSN EN 206-1. *Beton TKS*. 2002, 2. ročník, č. 1, s. 29. ISSN 1213-3116.

- [26] APONTE, Diego Fernando, Marilda BARRA a Enric VÀZQUEZ. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. *Construction and Building Materials*. 2012, svazek 30, s. 537-546. ISSN 09500618.
- [27] *Technické kvalitativní podmínky staveb českých drah : Kapitola 24 – Tunely*. Praha: České dráhy, s. o. – Divize dopravní cesty, o. z., 2006. Dostupné z: [http://pjkp.cz/TKP\\_24.pdf](http://pjkp.cz/TKP_24.pdf)
- [28] MERTA, Petr. Ocelové bednicí formy pro realizaci tunelů. *Beton TKS*. 2009, 9. ročník, č. 5, s. 58. ISSN 1213-3116.
- [29] Příčný řez pojízdnou ocelovou bednicí formou [obrázek]. In: MERTA, Petr. Ocelové bednicí formy pro realizaci tunelů. *Beton TKS*. 2009, 9. ročník, č. 5, s. 58. ISSN 1213-3116.
- [30] HILAR, Matouš. *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. Vyd. 1. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008, 68 s. Dokumenty českého tunelářského komitétu ITA-AITES. ISBN 978-802-5412-626.
- [31] *Technické kvalitativní podmínky pro dokumentaci staveb pozemních komunikací : Kapitola 7 – Tunely, podzemní stavby a galerie*. Aktualizované vyd. Praha: Ministerstvo dopravy, odbor infrastruktury, 2006. Dostupné z: [http://www.pjkp.cz/TKP-D\\_7.pdf](http://www.pjkp.cz/TKP-D_7.pdf)
- [32] ŘEHOŘ, František. Kontrola kvality tunelového ostění nedestruktivními zkušebními metodami. *Tunel*, 2000, ročník 9., č. 2, str. 23. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_2\\_00.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_2_00.pdf).
- [33] GROSSMANN, Michal a Radovan Matzner. Aktivace pojistného injektážního systému mezilehlých fóliových hydroizolací objektů podzemních staveb. *Tunel*, 2005, ročník 14., č. 1, str. 28. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_1\\_05.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_1_05.pdf).
- [34] VOLLMER, Michael. Nový systém protipožární ochrany tunelu pod Labem v Hamburku. *Tunel*, 2005, ročník 14., č. 1, str. 44. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_1\\_05.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_1_05.pdf).
- [35] HILAR, Matouš, Alun THOMAS a Leo FALKNER. Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu. *Tunel*, 2005, ročník 14., č. 4, str. 11. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_4\\_05.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_4_05.pdf).
- [36] JELÍNEK, Petr a Zdeněk KLEIN. Pokládka výztuže sekundárního ostění tunelů Mrázovka a Panenská. *Tunel*, 2005, ročník 14., č. 3, str. 12. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_3\\_05.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_3_05.pdf).

- [37] Příčný řez montážní plošiny v dolní poloze [obrázek]. In: JELÍNEK, Petr a Zdeněk KLEIN. Pokládka výztuže sekundárního ostění tunelů Mrázovka a Panenská. *Tunel*, 2005, ročník 14., č. 3, str. 12. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_3\\_05.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_3_05.pdf).
- [38] Montáž výztuže definitivního ostění [obrázek]. In: JELÍNEK, Petr a Zdeněk KLEIN. Pokládka výztuže sekundárního ostění tunelů Mrázovka a Panenská. *Tunel*, 2005, ročník 14., č. 3, str. 12. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_3\\_05.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_3_05.pdf).
- [39] CLEMENT, Franc a Michal ZÁMEČNÍK. Alternativy požární ochrany betonového ostění tunelů. *Tunel*, 2007, ročník 16., č. 1, str. 21. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_1\\_07.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_1_07.pdf).
- [40] Vliv teploty na beton a ocelovou výztuž (upraveno podle ITA 2004 a Khoury 2005) [obrázek]. In: CLEMENT, Franc a Michal ZÁMEČNÍK. Alternativy požární ochrany betonového ostění tunelů. *Tunel*, 2007, ročník 16., č. 1, str. 21. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_1\\_07.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_1_07.pdf).
- [41] SVOBODA, Jiří a Zbyšek Vozarik. Definitivní konstrukce dálničního tunelu Valík. *Tunel*, 2006, ročník 15., č. 4, str. 56. ISSN: 1211 – 0728. Dostupné z: [http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_4\\_06.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_4_06.pdf).
- [42] Watertight concrete. *Concrete Construction: Resources for contractors and specifiers including construction methods, materials and equipment*. [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: [http://www.concreteconstruction.net/Images/Watertight%20Concrete\\_tcm45-344747.pdf](http://www.concreteconstruction.net/Images/Watertight%20Concrete_tcm45-344747.pdf)
- [43] VÍTEK, Jan L. a Robert COUFAL. *Složení betonů pro vodonepropustné monolitické ostění*. CESTI [online]. 2013 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: [http://www.cesti.cz/technicke\\_listy/tl2013/2013\\_WP4\\_TL4\\_3\\_1.pdf](http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP4_TL4_3_1.pdf)
- [44] VÍTEK, Jan L., Robert COUFAL a Jana DEHNER. *Podmínky pro aplikaci vodonepropustných tunelových ostění*. CESTI [online]. 2013 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: [http://www.cesti.cz/technicke\\_listy/tl2013/2013\\_WP4\\_TL4\\_3\\_2.pdf](http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP4_TL4_3_2.pdf)
- [45] HANUŠ, Vít, Lukáš VRBA, Petr ŠTEMBERK a Ondřej ŠEVČÍK. *Vliv současných chemických příměsí a přísad na výsledné vlastnosti betonu* [online]. 2012 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS\\_2012\\_prisady\\_primesi.pdf](http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS_2012_prisady_primesi.pdf)
- [46] MAZUROVÁ, Milada. Speciální betony pro tunel Vítkov. *Metrostav* [online]. 2007 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: [https://www.metrostav.cz/cz/aktuality/aktualni\\_informace/detail?id=1547](https://www.metrostav.cz/cz/aktuality/aktualni_informace/detail?id=1547)

- [47] MAŘÍK, Libor. Projekt a provádění definitivního ostění tunelů SOKP 513. *ASB: Odborný portál pro profesionály v oblasti stavebnictví* [online]. 2011 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/tunely/projekt-aprovaeni-definitivniho-osteni-tunelu-sokp-513>
- [48] MAŘÍK, Libor, Vladimír MIKA, Viktor SLEZÁK, Ladislav ŠTEFAN a Eva TATÍČKOVÁ. Projekt sanace a sanování vad ostění votického tunelu na železniční trati Votice – Benešov u Prahy. In: *IKP Consulting Engineers* [online]. 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: [http://www.ikpce.com/download/reference/tunely/2012\\_Marik\\_Sanace\\_Voticky.pdf](http://www.ikpce.com/download/reference/tunely/2012_Marik_Sanace_Voticky.pdf)



## SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 – Složení betonů .....	47
Tab. č. 2 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Ref I) .....	48
Tab. č. 3 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Ref I) .....	48
Tab. č. 4 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Ref I) .....	49
Tab. č. 5 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Ref I) .....	49
Tab. č. 6 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Ref II) .....	49
Tab. č. 7 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Ref II) .....	49
Tab. č. 8 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Ref II) .....	49
Tab. č. 9 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Ref II) .....	49
Tab. č. 10 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Pop 20) .....	50
Tab. č. 11 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Pop 20) .....	50
Tab. č. 12 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Pop 20) .....	50
Tab. č. 13 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Pop 20) .....	50
Tab. č. 14 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Vap 20) .....	50
Tab. č. 15 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Vap 20) .....	50
Tab. č. 16 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Vap 20) .....	51
Tab. č. 17 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Vap 20) .....	51
Tab. č. 18 – výsledky zkoušek na čerstvém betonu (Str 20) .....	51
Tab. č. 19 – výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu (Str 20) .....	51
Tab. č. 20 – výsledky zkoušek vodotěsnosti na ztvrdlém betonu (Str 20) .....	51
Tab. č. 21 – výsledky zkoušky odolnosti proti CHRL po 50 a 100 cyklech (Str 20) .....	51
Tab. č. 22 – naměřené hodnoty a vyhodnocená měření na čerstvém betonu .....	52
Tab. č. 23 – vyhodnocená měření na ztvrdlém betonu .....	54
Tab. č. 24 – hloubka průsaku tlakovou vodou .....	55
Tab. č. 25 – Odolnost proti CHRL po 100 cyklech .....	57

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Zkušební metoda na hloubku průsaku [15].	31
Obr. 2:	Řez ukládacím vozem ve spodní poloze [37].	34
Obr. 3:	Montáž výztuže sekundárního ostění [38].	34
Obr. 4:	Řez bednicím vozem [29].	36
Obr. 5:	Vliv požáru na beton a ocelovou výztuž [40].	38
Obr. 6:	Rozměry L-boxu [16].	45
Obr. 7:	Grafické znázornění sednutí kužele u jednotlivých záměsů.	52
Obr. 8:	Grafické znázornění rozlití u jednotlivých záměsů.	52
Obr. 9:	Grafické znázornění obsahu vzduchu u jednotlivých záměsů.	53
Obr. 10:	Grafické znázornění objemových hmotností u jednotlivých záměsů.	53
Obr. 11:	Grafické znázornění objemových hmotností po 7 a 28 dnech.	54
Obr. 12:	Grafické znázornění pevností po 7 a 28 dnech.	54
Obr. 13:	hloubka průsaku tlakovou vodou.	56
Obr. 14:	Odpad při zkoušce CHRL.	57